57. E.

22102147315

Med
K25911

TRAITÉ PRATIQUE

D'ÉLECTRICITÉ

Bourloton. — Imprimeries réunies, B.

CHEMICAL SOCIETY
CIRCULATING LIBRARY
BURLINGTON HOUSE W.

TRAITÉ PRATIQUE
D'ÉLECTRICITÉ

COMPRENANT LES APPLICATIONS

AUX SCIENCES ET A L'INDUSTRIE

ET NOTAMMENT

A LA PHYSIOLOGIE, A LA MÉDECINE, A LA TÉLÉGRAPHIE
A L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE, A LA GALVANOPLASTIE, A LA MÉTÉOROLOGIE, ETC., ETC.

PAR

C. M. GARIEL

Membre de l'Académie de médecine, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Agrégé de physique à la Faculté de Médecine de Paris
Professeur de physique et de chimie à l'École nationale des Ponts et Chaussées

TOME SECOND

Avec 347 figures dans le texte

PARIS
OCTAVE DOIN, ÉDITEUR
8, PLACE DE L'ODÉON, 8
1886

Tous droits réservés

9 832 560

WELLCOME INSTITUTE
LIBRARY
Coll. welMOmec
Call
No. WB

TRAITÉ PRATIQUE

D'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

LES ACTIONS CHIMIQUES ET LES COURANTS

358. — Nous avons donné, dans le premier volume, l'indication générale des relations qui unissent les actions chimiques et les courants électriques et nous avons indiqué les principales lois qui régissent les phénomènes : nous avons à signaler maintenant les applications de ces lois et de ces relations.

On pourrait, à la rigueur, faire rentrer la description des piles dans ce chapitre; les plus importantes ont été décrites ainsi que les accumulateurs; nous n'avons donc à signaler que les modèles nouveaux qui ont été inventés depuis la publication du volume précédent. Nous nous restreindrons d'ailleurs à un très petit nombre de types qui pour des raisons diverses nous ont paru présenter un intérêt réel, sans nous arrêter à parler de modifications de forme de peu d'importance, ou de systèmes qui ne semblent pas susceptibles d'applications effectives.

Les piles et les accumulateurs sont l'application de la production des courants par les actions chimiques; les actions chimiques produites par des courants électriques donnent lieu à des applications

beaucoup plus importantes et dont quelques-unes sont véritablement industrielles; nous en décrivons certaines avec détail, au moins en ce qui concerne le côté électrique de la question, et nous indiquerons le principe de quelques autres.

359. Pile a oxyde de cuivre de Lalande et Chaperon. — Cette pile est basée sur l'action exercée par les solutions alcalines sur le zinc; cette disposition est avantageuse en ce que l'attaque du métal ne se produit que lorsque le circuit est fermé et qu'aucune action ne se produit tant que le circuit reste ouvert; il faut joindre à ces éléments un dépolarisant et MM. de Lalande et Chaperon ont reconnu que l'oxyde de cuivre obtenu par le grillage du métal à l'air

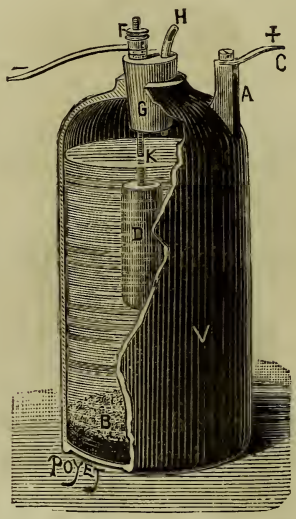


Fig. 254. — Pile à oxyde de cuivre (*de Branville*).

donne de bons résultats; ils ont indiqué plusieurs modèles qui paraissent devoir donner de bons résultats dans la pratique.

Dans l'un de ces modèles, le vase extérieur qui est en fonte et sert de pôle positif a la forme d'un obus V (fig. 254); il est extérieurement paraffiné à chaud pour obtenir un isolement suffisant : on dispose au fond une couche B d'oxyde de cuivre et l'on verse la dissolution alcaline à 30 ou 40 p. 100; le zinc D a la forme d'un cylindre de $0^m,02$ de diamètre et il est soudé à une tige de laiton amalgamé qui passe à travers un bouchon de caoutchouc et se termine par une borne F qui forme le pôle négatif; le bouchon est en outre traversé par un tube métallique terminé par un tube de

caoutchouc fendu G jouant le rôle de soupape pour permettre le dégagement des gaz. Un élément de $0^m,09$ de diamètre et de $0^m,27$ environ de hauteur peut donner un débit de 2 ampères.

Un autre modèle, pouvant donner un débit de 8 à 10 ampères, présente la même disposition générale; le vase en fonte à peu près de même hauteur a la forme générale d'une cloche de $0^m,22$ de diamètre; le zinc est constitué par une longue lame enroulée en spirale, et le support en laiton amalgamé est fixé à un couvercle en ébonite traversé également par un tube à soupape.

Une disposition plus simple est constituée par un vase en verre V

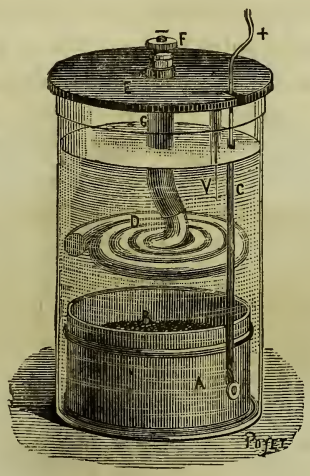


Fig. 255. — Pile à oxyde de cuivre (*de Branville*).

(fig. 255) contenant la dissolution alcaline; au fond se trouve une boîte de tôle A dans laquelle est l'oxyde de cuivre.

Un modèle à grand débit donnant de 10 à 15 ampères est constitué par une boite rectangulaire en tôle A (fig. 256) au fond de laquelle on dispose une couche d'oxyde de cuivre. Le zinc est une plaque rectangulaire D reposant aux quatre angles sur des isolateurs en porcelaine L et recourbée en D′ pour recevoir la borne M qui sert de pôle.

360. Piles humides. — Aux piles humides qui ont été déjà signalées, il convient d'ajouter les modèles proposés par M. Guérin, dans lesquels le liquide est immobilisé pour ainsi dire par l'emploi d'une substance gélatineuse. M. Guérin emploie l'agar-agar dans la proportion de 1 à 5 p. 100 suivant les substances chimiques

qui doivent être mélangées à l'eau; la dissolution se fait à chaud; par le refroidissement le liquide se prend en gelée.

Outre que cette disposition supprime l'inconvénient du liquide dans le cas où la pile doit être transportée, elle fait disparaître les sels grimpants. Elle se prête très commodément à la construction des éléments Leclanché à agglomérés. Dans des éléments que nous avons étudiés, la force électromotrice était inférieure seulement de $0^{volt},03$ à $0^{volt},04$ à celle des piles Leclanché ordinaires. La résistance d'un élément de moyennes dimensions était de $0^{ohm},9$ environ.

Grâce à la consistance de la gelée, il est possible de remplacer les vases en verre par des caisses en bois, à la condition d'employer du bois bien paraffiné. On peut construire des batteries occupant peu de place et ne présentant point le caractère de fragilité des batteries où on emploie des vases en verre : les divers éléments sont obtenus en disposant des cloisons rectangulaires dans une caisse en bois de

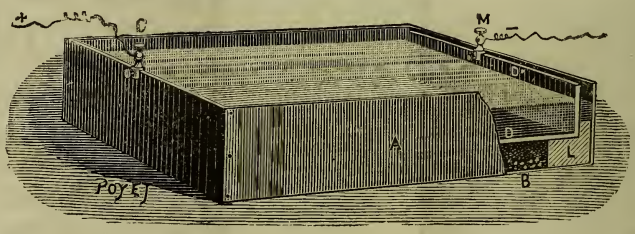


Fig. 256. — Pile à oxyde de cuivre à grand débit.

dimensions convenables. Mais pour que la force électromotrice ne soit pas affaiblie, il est nécessaire que les cloisons intermédiaires soient absolument isolantes; cette condition est difficile à réaliser.

Nous signalerons également la pile J. Thiébault du genre des éléments Leclanché à agglomérés où le liquide est remplacé par du plâtre mélangé de chlorhydrate d'ammoniaque et gâché avec de l'eau; M. G. Dumont l'a améliorée en ajoutant à ce mélange du chlorure de calcium qui entretient l'humidité; ce modèle a donné des résultats satisfaisants.

361. Modèles nouveaux d'accumulateurs. — De nombreux modèles d'accumulateurs ont été imaginés sans que, jusqu'à présent, ils aient paru satisfaire à tous les besoins de la pratique; ils présentent toujours la même disposition générale et diffèrent seulement par la nature ou la construction des lames servant d'électrodes.

C'est ainsi que M. Reynier a disposé des plaques de plomb plissé

maintenues dans un cadre rigide en plomb (fig. 257); dans d'autres modèles un cadre analogue est rempli par une masse constituée par une agglomération de fils de plomb (fig. 258) constituant une sorte de feutrage. Ces plaques ont $0^{m},13$ sur $0^{m},245$, leur poids $1^{k},500$ ou $1^{k},700$, la force électromotrice est indiquée comme égale à $1^{volt},87$. Un accumulateur formé de 3 plaques présente une résistance de $0^{ohm},04$; il faut un courant de 2 ampères pour le charger; le courant de décharge serait de 5 ampères et la capacité de l'accumulateur de 85 000 coulombs. Le poids total du système est de 8 kilogrammes environ.

Dans d'autres modèles, les plaques positives sont de l'un des types

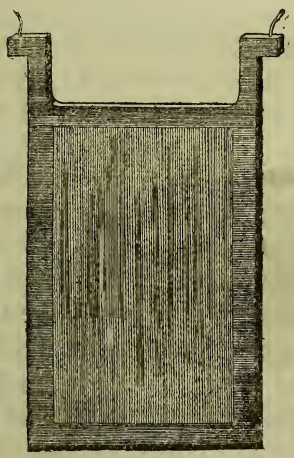


Fig. 257. — Accumulateur plissé. (*Simmen.*)

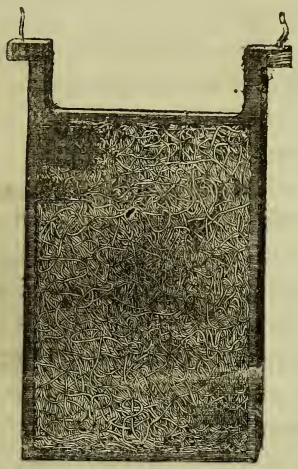


Fig. 258. — Accumulateur feutré. (*Simmen.*)

précédents; mais les plaques négatives sont des feuilles de plomb lisses; le liquide employé est une dissolution de sulfate de zinc, de telle sorte que les feuilles de plomb sont bientôt zinguées. La force électromotrice de ces accumulateurs est de $2^{volts},37$; avec 7 plaques, 4 positives et 3 négatives, le poids total est de 17 kilogrammes environ, la résistance de $0^{ohm},02$, le courant de charge de 5 à 10 ampères, le courant de décharge de 25 ampères et la capacité de 550 000 coulombs.

Ces divers modèles n'ont pas encore subi pendant assez longtemps l'épreuve de la pratique pour que l'on puisse être assuré de leur valeur réelle.

362. Des conditions générales de l'application des actions chi-

MIQUES PRODUITES PAR LES COURANTS. — Les applications des actions chimiques de l'électricité sont devenues assez nombreuses; la plupart se rapportent à l'électrolyse des composés métalliques pour laquelle nous avons indiqué les lois de Faraday; un moindre nombre utilise l'action du courant sur les composés organiques; enfin il convient de signaler l'emploi spécial de l'effluve dans les laboratoires pour aider à la production de certaines actions chimiques lentes.

Nous nous occuperons d'abord de l'électrolyse des composés métalliques : dans l'étude des applications, nous nous bornerons à faire ressortir surtout les points qui se rattachent aux actions électriques, passant rapidement sur les autres détails de manipulation qui sont développés dans les traités spéciaux de galvanoplastie par exemple.

363. — Considérons un circuit comprenant une pile, un galvanomètre et une bobine de résistance déterminée; mesurons l'intensité du courant; remplaçons la bobine par un électrolyte présentant la même résistance[1].

Si la pile a une force électromotrice suffisante, l'électrolyse se produira, mais en même temps on reconnaîtra que le courant a diminué d'intensité. L'effet est donc le même que si la résistance avait augmenté, ou que si la force électromotrice avait diminué.

On ne comprendrait pas que la résistance eût augmenté; il est aisé de concevoir, au contraire, que la force électromotrice ait diminué, ou plutôt qu'il ait pris naissance dans le circuit une autre force électromotrice opposée à la force électromotrice de la pile, de telle sorte que le courant n'est plus produit que par la différence de ces forces électromotrices.

Cette force électromotrice opposée, force contre-électromotrice, qui prend naissance, correspond à l'énergie employée pour produire le travail chimique de séparation des éléments; elle est égale et contraire à la force électromotrice qui prendrait naissance par la combinaison des éléments qui sont ainsi séparés; c'est, en dehors de la pile, un phénomène analogue à celui qui dans la pile produit la polarisation des électrodes.

Il résulte évidemment de ces considérations que pour que l'électrolyse puisse avoir lieu, il faut que le travail chimique développé dans la pile soit supérieur au travail chimique absorbé dans l'électrolyte, que la force électromotrice de la pile soit supérieure à la force contre-électromotrice de l'électrolyte. L'énergie fournie en

1. On peut mesurer la résistance, la conductibilité des liquides en employant une pile de force électromotrice faible de manière que l'électrolyse n'ait pas lieu.

excès par la pile est transformée et amène l'échauffement des conducteurs.

L'étude des questions d'électrolyse se trouve donc ainsi rattachée très directement à celle des quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans les actions chimiques, quantités de chaleur qui mesurent le travail chimique. On a dit que dans un circuit où il ne se produit aucune autre action, la quantité de chaleur correspondant aux actions chimiques dégagées dans la pile entière est égale à la somme de la quantité de chaleur absorbée par l'électrolyte et de la quantité de chaleur qui apparaît dans le circuit tout entier. Il n'en est cependant pas tout à fait ainsi, et la chaleur *voltaïque* recueillie dans un circuit n'est pas nécessairement égale à la chaleur *chimique* correspondant aux réactions qui ont lieu dans la pile ; aussi les résultats que nous indiquons représentent-ils seulement une première approximation.

Il importe de se rappeler que s'il existe plusieurs électrolytes dans le circuit et plusieurs éléments de pile, il y a autant d'équivalents de métal déposé dans chaque électrolyte qu'il y a d'équivalents de zinc brûlé dans chaque élément de pile (146).

364. — Nous considérerons seulement le cas où il y a un seul électrolyte, mais nous admettrons que la pile comprend n éléments. Recherchons les conditions de possibilité de l'électrolyse dans des circonstances déterminées.

Soient I l'intensité du courant, e la force électromotrice de chaque élément de pile, E′ la force contre-électromotrice de l'électrolyte, ε l'équivalent chimique du métal (l'hydrogène pris pour terme de comparaison), p le poids du métal mis en liberté en une seconde, π le poids du zinc brûlé dans chaque élément de pile; on connaît d'ailleurs l'équivalent du zinc Zn et l'on sait qu'un courant de 1 ampère dégage $0^{mgr},01041$ d'hydrogène en 1 seconde.

D'après les lois de Faraday, on a pour la quantité du métal déposé en 1 seconde :

$$p = 0^{mgr},01041\varepsilon I$$

et pour le zinc brûlé dans le même temps dans chaque élément de pile

$$\pi = 0^{mgr},01041.Zn.I$$

Le courant nécessaire pour produire l'effet observé a donc une intensité :

$$I = \frac{p}{0,01041\varepsilon}$$

Quel est le travail utilisé dans le circuit? En unités absolues, il se compose du travail de décomposition représenté par E'I et du travail correspondant à l'échauffement du circuit qui est RI^2; évalué en unités pratiques, grammètres, il sera pour 1 seconde :

$$T = \frac{E'I}{g} + \frac{RI^2}{g}$$

et en remplaçant I par sa valeur :

$$T = \frac{E'p}{0{,}01041 g\varepsilon} + \frac{R.p^2}{0.01041^2 g\varepsilon^2}$$

On voit d'abord que pour déposer une quantité donnée de métal en 1 seconde la quantité d'énergie croît avec la résistance du circuit, c'est-à-dire avec la distance, par exemple.

Mais de plus on peut écrire cette équation :

$$\frac{T}{p} = \frac{E'}{0{,}01041 g\varepsilon} + \frac{Rp}{0{,}01041^2 g\varepsilon^2}$$

qui donne la quantité de travail nécessaire par unité de poids du métal déposé. Or on voit que $\frac{T}{p}$ croît avec p, c'est-à-dire que le travail nécessaire par unité de poids du métal déposé croît avec p; autrement, le prix de l'unité de métal déposé est d'autant plus grand que le dépôt s'effectue plus rapidement.

Mais le travail ainsi absorbé est fourni par la pile, et nous pouvons évaluer l'énergie fournie par les n éléments. Elle est en effet $\frac{neI}{g}$ et I est donné par la relation.

$$I = \frac{\pi}{0{,}01041 Zn}$$

On doit donc avoir la relation :

$$\frac{ne\pi}{0{,}01041 g.Zn} = \frac{E'p}{0{,}01041 g.\varepsilon} + \frac{Rp^2}{0{,}01041^2 g^2 \varepsilon}$$

Équation qui se simplifie, parce que d'après la loi de Faraday on a $\frac{p}{\varepsilon} = \frac{\pi}{Zn}$; il vient alors :

$$ne = E' + \frac{Rp}{0{,}01041\varepsilon} \qquad (1)$$

La condition nécessaire pour que l'électrolyse ayant lieu puisse déposer un poids p du métal par seconde est déterminée par cette relation; il faudra donc, pour être assuré d'atteindre le résultat, prendre un nombre n d'éléments rendant le premier membre égal ou supérieur au deuxième.

Si l'on veut seulement que la décomposition ait lieu sans préciser la quantité de métal dégagé, il faudra supposer p très petit. On pourra alors à la limite négliger le dernier terme et la condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait électrolyse est que $ne > E'$; on ne peut passer à la limite et admettre $ne = E'$, car alors il n'y aurait pas de courant.

365. — Le rendement, rapport entre le travail utilisé et le travail dépensé est représenté par $\frac{E'}{ne}$

On voit que l'on a :

$$\frac{E'}{ne} = 1 - \frac{1}{ne}\,\frac{Rp}{0{,}01041\varepsilon}$$

Le rendement sera d'autant plus près de 1 que la quantité de métal sera plus petite pour une même distance, ou que la distance sera plus petite pour une même quantité de métal déposé. On pourra d'ailleurs, quelle que soit la distance, maintenir le rendement constant à la condition que Rp restera constant; nous n'insistons pas sur cette constance du rendement entendue dans ce sens particulier, la discussion à faire est la même que celle que nous indiquerons pour les machines dynamo-électriques.

La quantité de chaleur produite dans le circuit représente une perte, perte inévitable, conséquence forcée de la transmission du courant, perte qu'il faut restreindre le plus possible. On voit qu'elle est proportionnelle à $\frac{Rp}{\varepsilon}$; on ne peut pas modifier ε; p est déterminé, en général, par les conditions qui assurent le dépôt satisfaisant du métal et ne peut guère varier; il faudra donc, autant que possible, diminuer R.

366. — Les valeurs que nous avons écrites plus haut permettent d'établir la relation qui existe entre la force électromotrice d'une pile ou la force contre-électromotrice d'un électrolyte et la quantité de chaleur qui correspond à l'action chimique qui se produit.

D'une manière générale, l'énergie *évaluée en kilogrammètres* sera, pour une action chimique correspondant à une quantité p de métal :

$$\frac{E'p}{0{,}00001041g\varepsilon}$$

La quantité de chaleur s'obtiendra en divisant ce nombre par A, équivalent mécanique de la chaleur. D'autre part on connaît la chaleur correspondant à l'action chimique C ; elle est donnée par un poids du corps représentant son équivalent : il faut donc poser $p = \varepsilon$ et il vient :

$$\frac{E'}{0{,}00001041 gA} = C$$

Cette formule s'appliquerait également aux piles.

Il faut remarquer que lorsqu'il se produit plusieurs actions chimiques, il faut tenir compte dans ce calcul de toutes les quantités de chaleur absorbées ou dégagées.

Ainsi, dans l'électrolyse de l'eau acidulée, l'acide est décomposé, mais se reforme aux dépens de l'eau, de telle sorte que finalement, au point de vue de la chaleur, le résultat est le même que si l'eau seulement était décomposée. Or la chaleur qui correspond à la combinaison de l'équivalent d'hydrogène et de l'équivalent d'oxygène est représentée par 34 450 calories (grammes-degrés), ou $34^{\text{cal.}},450$ (grandes calories) et l'on a : A = 424 kilogrammes. Tout calcul fait, il vient :

$$E' = 1{,}58 \textit{ volt.}$$

Dans la pile Daniell, par exemple, il faut tenir compte de deux actions : 1° le zinc se dissolvant dans l'acide sulfurique dégage $1^{\text{gr. cal.}},670$ par gramme, soit $55^{\text{gr. cal.}},275$ pour un équivalent ; 2° le cuivre se déposant de son sulfate absorbe $0^{\text{cal.}},8$ par gramme, soit $27^{\text{cal.}},7515$ par équivalent.

La première action donnera naissance à une force électromotrice ; la seconde, opposée, à une force électromotrice que l'on peut évaluer séparément : la force électromotrice réelle sera la différence. On peut remarquer, autrement, que les actions chimiques laissent libres une quantité de chaleur égale à $55^{\text{cal.}},275 - 27^{\text{cal.}},751 = 27^{\text{cal.}},524$. On aura en introduisant cette valeur dans la formule :

$$e = 1{,}18$$

valeur peu éloignée de la valeur réelle.

367. — Il est un cas utile à signaler : c'est celui dans lequel le bain électrolytique contient une électrode soluble de même nature que le métal du sel. Dans ce cas, il ne peut y avoir de force contre-

électromotrice, puisque le bain ne subit aucune modification ; dans ce cas on a $E' = 0$ et il vient pour le travail nécessaire à produire l'électrolyse :

$$\frac{Rp^2}{0{,}01041^2 g\varepsilon^2}$$

quantité petite en général.

Si le courant est produit par une pile le nombre d'éléments à employer sera donné par la formule :

$$ne = \frac{Rp2}{0{,}01041^2 g\varepsilon}$$

Naturellement rien ne serait changé à ce que nous venons d'indiquer relativement à l'électrolyse si on employait comme source du courant une pile thermo-électrique ou une machine. Le premier membre seulement changerait de forme ; mais sa valeur devrait toujours être égale ou supérieure à celle du second membre, et cela permettrait de déterminer la source de courant qu'il conviendrait d'employer.

368. Applications industrielles de l'électrolyse des composés métalliques. — L'électrolyse appliquée à des composés métalliques est utilisée fréquemment dans l'industrie, mais sauf une ou deux applications encore très restreintes, toutes les opérations que nous aurons à signaler se résument à une seule qui peut, il est vrai, se présenter dans des conditions variées : le dépôt des métaux, leur séparation des dissolutions dans lesquelles ils se trouvent ou des substances étrangères avec lesquelles ils se trouvent combinés ou mélangés.

Le but que l'on cherche à atteindre n'est pas toujours le même : il peut consister dans la production même du dépôt métallique, c'est alors la galvanoplastie, la dorure, l'argenture, le nickelage, etc.

On peut chercher à retirer un métal pur d'un alliage contenant une proportion plus ou moins considérable de substances étrangères ; c'est alors l'affinage électrolytique.

Enfin on peut avoir pour but de retirer le métal des minerais qui le renferment ; c'est alors l'électrométallurgie ; l'emploi du courant peut d'ailleurs, suivant les circonstances, avoir une importance plus ou moins grande et les opérations électriques peuvent dans certains cas se rapprocher beaucoup de celles de l'affinage.

Disons en outre que des procédés très analogues à ceux de l'affi-

nage permettent de faire dans des conditions favorables des essais, des dosages de minerais, etc.

Dans ces opérations on désigne souvent l'électrode positive sous le nom d'*anode* et souvent aussi, quoique moins fréquemment, l'électrode négative sous le nom de *cathode*.

369. — Le principe des dépôts métalliques et celui de l'affinage sont, au fond, le même et peuvent se ramener à l'opération que nous avons étudiée plus haut :

Dans un bain contenant en dissolution un sel d'un métal, on plonge une anode soluble formée par ce métal même, pur ou renfermant une quantité plus ou moins considérable de matières étrangères; le courant passant, lorsque la cathode aura été plongée dans le liquide, le métal se portera sur cette cathode par suite de l'électrolyse du sel, mais le sel se reformera par dissolution de l'anode (129). Si l'anode est pure, la composition du liquide ne changera pas et l'opération pourra être continuée autant qu'on le voudra en remplaçant l'anode lorsqu'elle aura été dissoute en entier; la force électromotrice à employer sera faible dans ce cas, comme nous l'avons indiqué, quoiqu'elle ne soit pas nulle.

Si l'anode est plus ou moins impure, il se produira dans le bain des substances étrangères qui le souilleront de plus en plus, au fur et à mesure que l'opération se prolongera ; suivant les cas ces substances resteront en dissolution, ou, après s'être maintenues en suspension tomberont au fond. Le choix du sel qui constitue la solution principale doit être fait de manière que les produits qui prennent ainsi naissance ne viennent pas troubler la suite des opérations; il repose donc sur des considérations chimiques que nous n'avons pas à développer. En général, l'opération pourra être continuée pendant un assez long temps sans qu'il soit nécessaire de renouveler le liquide. Dans ce cas, d'autre part, la force électromotrice devra être plus considérable que dans le cas précédent, puisqu'il y a une partie du sel décomposé qui n'est pas reproduite par la dissolution de l'anode.

370. — D'une manière générale, les opérations de l'électrométallurgie peuvent se diviser en deux grands groupes.

Dans le premier cas, les minerais sont soumis à des traitements variés qui amènent le corps que l'on veut extraire à l'état de combinaison soluble ; on effectue la dissolution et l'on traite la liqueur par un courant électrique ; il y a bien comme dans les opérations précédentes décomposition du sel, mais le sel ne se reforme pas, il n'y a pas d'électrode soluble.

Dans un second cas, le minerai est soumis à des opérations préliminaires qui le ramènent à une composition et un état déterminés à l'avance; et c'est cette substance solide complexe que l'on prend comme électrode soluble dans un bain qui a été convenablement choisi. On a admis quelquefois, on l'a dit au moins, que cette substance complexe était électrolysée ; cela ne nous paraît pas exact et nous croyons plutôt que c'est le liquide qui seul est électrolysé, les modifications subies par l'électrode étant le résultat d'actions secondaires.

Enfin il est quelques opérations accessoires dans lesquelles l'électricité joue un rôle et qui peuvent être rattachées à ces applications de l'électro-chimie.

371. — Dépot électrolytique des métaux; galvanoplastie. — Si, au point de vue des phénomènes électriques, il n'existe pas de différences entre les diverses opérations de dépôt métallique, il en existe au contraire de très considérables au point de vue des résultats obtenus; tantôt, en effet, il s'agit seulement de recouvrir un objet donné d'une couche métallique adhérente dans un but de décoration ou de protection, tantôt il s'agit de déposer le métal dans un moule d'où on pourra le sortir et dont il gardera la forme, permettant ainsi de reproduire autant de fois qu'on le veut l'objet sur lequel le moule a été pris.

Dans une opération de dépôt métallique il y a à considérer : l'objet sur lequel le métal doit être déposé, le bain qui est soumis à l'action du courant et la source d'électricité. Lorsqu'il s'agit d'une opération industrielle, il y a en outre à considérer la disposition générale à adopter. Nous étudierons ces questions l'une après l'autre en insistant surtout sur les points qui se rattachent plus directement à l'électricité.

372. — Lorsqu'il s'agit d'avoir un dépôt adhérent sur une pièce métallique, il faut au préalable la dégraisser et la laver avec soin avant de l'introduire dans la cuve électrolytique; il convient même d'avoir recours à un décapage qui se produit soit par des procédés mécaniques, en frottant vigoureusement la pièce avec des brosses dures, soit par des procédés chimiques propres à enlever les matières étrangères qui ont pu prendre naissance à la surface, notamment par l'emploi de bains acides faibles ; la pièce est séchée par l'action de la sciure de bois chauffée.

Dans quelques cas, le dépôt du métal ne peut se faire directement et il faut avoir recours à des moyens détournés; c'est ainsi que l'on ne peut déposer directement l'or et l'argent sur le fer; il

faut au préalable déposer une couche de cuivre sur les objets en fer; ils sont alors susceptibles de recevoir la dorure et l'argenture; dans ce cas la couche de cuivre peut être excessivement mince. On peut d'ailleurs remplacer la couche de cuivre par un léger dépôt d'un autre métal.

On peut recouvrir entièrement d'une couche de métal mince, de manière à ne pas en altérer la forme, des objets quelconques, des fleurs, des feuilles par exemple; mais il faut rendre d'abord leur surface conductrice. On y arrive en plongeant ces objets dans un sel métallique et les soumettant à l'action d'un corps réducteur; par exemple on fait usage d'une solution alcoolique d'azotate d'argent d'une part, et d'autre part d'hydrogène sulfuré ou d'hydrogène phosphoré.

373. — S'il s'agit de galvanoplastie, c'est-à-dire s'il faut reproduire un objet déterminé, il faut d'abord avoir un moule. La nature de ce moule est indifférente et l'on emploie la matière qui se prête le mieux à l'opération dans le cas où l'on se trouve : plâtre, cire, gélatine, stéarine, métal de Darcet; c'est la gutta-percha qui paraît la substance la plus employée, soit qu'on la ramollisse et qu'on obtienne l'empreinte en pressant cette substance contre l'objet, soit même qu'on la fonde et qu'on la coule sur l'objet.

Pour que le dépôt métallique puisse se faire, il faut que la surface du moule soit conductrice, ce qui n'arrive que dans quelques cas particuliers, par exemple lorsque le moule est en alliage fusible. Le procédé le plus ordinaire consiste à recouvrir le moule de plombagine; la plombagine doit être pure, réduite en poudre fine, elle se fixe aisément par simple contact à la surface du moule.

On a proposé l'emploi de poudres métalliques, soit pour remplacer la plombagine, soit pour constituer un mélange qui serait plus conducteur; il ne semble pas qu'il y ait avantage à cette substitution. Si le moule présentait des parties très creuses où il fut impossible d'obtenir un dépôt convenable de plombagine, il faudrait métalliser le moule, l'argenter par exemple, en employant le procédé que nous avons indiqué ci-dessus.

La fonte se prête mal au cuivrage direct par les procédés ordinaires; M. Oudry a obtenu le dépôt de cuivre dans de très bonnes conditions en recouvrant l'objet à cuivrer d'une couche de vernis résineux contenant du minium et diverses autres substances; après séchage l'objet vernis était enduit de plombagine, puis plongé dans le bain électrolytique où l'opération se terminait régulièrement. Disons que par des modifications dans la composition du bain, on

est arrivé à obtenir le cuivrage direct dans de bonnes conditions.

374. — La nature du bain qui sert à produire un dépôt galvanique est très variable; chaque fabricant, pour ainsi dire, a sa formule particulière; aussi nous bornerons-nous à quelques indications générales.

Dorure. — Le bain est constitué par une dissolution de cyanure double de potassium et d'or; on obtient cette dissolution en maintenant à l'ébullition pendant quelques heures une dissolution de cyanure de potassium (1250 grammes pour 50 litres) dans laquelle on a versé la liqueur obtenue en traitant 50 grammes d'or par l'eau régale et évaporant jusqu'à consistance sirupeuse.

Il existe d'ailleurs de nombreuses autres formules qui donnent des résultats également satisfaisants.

L'opération marche très régulièrement si l'on a soin de chauffer le bain liquide à 70° environ pendant le passage du courant.

Argenture. — On emploie également le cyanure double de potassium et d'argent. On peut faire le cyanure double en traitant directement de l'azotate d'argent par de l'acide cyanhydrique et versant la liqueur dans une solution de cyanure de potassium. On traite par exemple 250 grammes d'argent par 500 grammes d'acide azotique ce qui fournit la quantité d'azotate nécessaire pour 500 grammes de cyanure de potassium et 10 litres d'eau.

Pour l'argenture, comme pour la dorure, il existe diverses formules également pratiques.

Le dépôt d'argent se fait sans qu'il soit nécessaire de chauffer le bain.

Cuivre. — Le bain de cuivre est différent suivant les conditions.

Pour la galvanoplastie et pour le dépôt sur les métaux autres que le fer et le zinc, le bain est constitué par une solution de sulfate de cuivre saturée; on ajoute généralement une petite proportion d'acide sulfurique, 5 à 8 p. 100; cet acide rend le liquide plus conducteur et on a reconnu qu'il rend plus régulier le dépôt du métal qui n'est alors ni grenu, ni cassant; de plus cet acide évite les réactions accidentelles qui pourraient se produire avec des eaux trop calcaires.

La dissolution de sulfate de cuivre ne peut servir à cuivrer le fer ni le zinc; par simple contact avec ces métaux, le cuivre se précipite de la solution, mais donne un dépôt qui ne présente pas une adhérence suffisante. On réussit très bien à produire le cuivrage dans ce cas par l'emploi de diverses formules.

Formule de M. Weill : 10 litres d'eau, 350 grammes de sulfate de

cuivre, 500 grammes de tartrate double de sodium et de potassium, 800 grammes de soude.

Nickel. — Les bains de nickel présentent des compositions variables; on obtient de bons résultats par l'emploi d'une dissolution de sulfate double de nickel et d'ammonium; il convient que la dissolution soit et reste neutre. La proportion de 70 à 80 grammes de sel par litre paraît convenable.

Étain. — L'étamage galvanique s'obtient à l'aide de bains de compositions diverses; par exemple, on a proposé les formules suivantes :

Solution de soude caustique, protochlorure d'étain, cyanure de potassium.

Pyrophosphate de potassium 450 grammes, protochlorure d'étain 150 grammes, eau 650 grammes.

Solution de soude caustique, additionnée de 5 p. 100 d'ammoniaque, mélange de phosphate, de bioxyde et de protoxyde d'étain (obtenu en précipitant par le phosphate de sodium une solution concentrée de protochlorure d'étain).

Zinc. — L'opération du zincage galvanique n'est pas très usitée, parce que le zincage direct par fusion donne de bons résultats. On obtient des bains propres à l'électrolyse en traitant une dissolution de sulfate de zinc par un excès de potasse caustique, ce qui donne une solution d'oxyde de zinc dans la potasse.

Plomb. — On peut également déposer du plomb galvaniquement; on fait usage d'un bain contenant 10 grammes de litharge dissous dans 100 grammes de potasse et 2 litres d'eau.

Fer. — On peut obtenir des dépôts de fer en électrolysant un bain composé de protochlorure de fer et de chlorure d'ammonium; le bain se prépare en faisant agir un courant sur une solution assez concentrée de chlorure d'ammonium, les électrodes étant constituées par des plaques de fer; on doit prolonger l'action jusqu'à l'apparition d'une coloration verdâtre due à la production de sesquioxyde de fer.

Il est possible d'obtenir des dépôts d'autres métaux, tels que le palladium, le cobalt; mais il n'y a pas encore d'applications un peu étendues.

375. — Mais ce ne sont pas seulement des métaux simples que l'on dépose galvaniquement, on arrive à obtenir le dépôt d'alliages divers.

C'est ainsi que l'on obtient des dépôts de laiton sur le fer et sur le zinc : le bain contient toujours deux sels, l'un de zinc, l'autre de

cuivre auxquels on ajoute du cyanure de potassium ; voici une formule, par exemple :

Sulfite de soude 700 grammes, cyanure de potassium 100 grammes, eau 20 litres, d'une part, mélangés d'autre part avec : acétate de cuivre 350 grammes, chlorure de zinc 350 grammes, ammoniaque 400 grammes, eau 5 litres.

On peut opérer autrement en constituant le bain sur place : pour cela on fait une dissolution de cyanure de potassium et l'on y fait passer un courant en prenant pour anode une plaque de métal quelconque et pour cathode une lame de laiton. Il se produit d'abord des actions diverses, mais après quelque temps le laiton commence à se déposer; on peut alors remplacer la cathode par l'objet sur lequel on veut obtenir le dépôt métallique. Mais on n'obtient pas toujours ainsi la teinte que l'on désire; avant de changer la cathode, on remplace l'anode par une lame de cuivre si la teinte est trop pâle, par une lame de zinc si la teinte est trop foncée. Quand on est arrivé à la coloration cherchée, on remet l'anode soluble en laiton et on met comme cathode l'objet sur lequel doit se faire le dépôt. Dans ces conditions, les proportions du zinc et du cuivre dans le bain ne sont pas les mêmes que celles de l'alliage qui se dépose, mais ces proportions restent invariables pendant l'opération, puisque l'anode qui se dissout a la même composition que l'alliage qui se dépose.

Le dépôt ne continue à se produire régulièrement que si le courant conserve la même intensité : il se dépose d'autant plus de cuivre que le courant est plus intense. L'opération doit donc être surveillée attentivement.

On peut également, dans un but de décoration, déposer sur certaines parties d'une pièce de l'or vert (alliage d'or et d'argent) ou de l'or rouge (alliage d'or et de cuivre) ; ces dépôts se font seulement sur les parties indiquées, ces parties restent seules soumises à l'action des bains, le reste étant recouvert d'un vernis.

Pour ces alliages on ne peut déterminer à l'avance la composition du bain et l'on opère par tâtonnements. On fait passer le courant dans un bain d'or ordinaire en prenant pour anode soluble une plaque d'argent (ou de cuivre si l'on veut obtenir de l'or rouge) : on arrête cette opération préliminaire lorsque, sur une plaque d'essai placée à la cathode, le dépôt a la couleur cherchée ; on remplace alors l'anode dont on s'était servi par une autre d'or vert (ou or rouge) ayant même coloration et même composition que le dépôt obtenu.

Comme précédemment, la proportion des métaux dans le bain n'est pas la même que dans l'alliage qui se dépose.

376. — La source d'électricité qui sert à produire les dépôts varie suivant l'importance des opérations.

Dans quelques cas, pour le dépôt du cuivre ou de l'étain on peut supprimer même toute source de courant extérieur au bain lui-même.

C'est ce qui se présente pour l'appareil simple à galvanoplastie qui a été employé au début et qui n'est en somme autre chose qu'une pile de Daniell dont l'électrode positive est constituée par l'objet sur lequel on veut déposer le cuivre. Cet appareil se compose d'un vase (fig. 259) ou d'une auge (fig. 260) dans laquelle est une solution saturée de sulfate de cuivre : un ou plusieurs vases poreux sont plongés dans cette dissolution, ils contiennent de l'eau acidulée et des lames de zinc. Les lames de zinc sont réunies par un conducteur ; à ce conducteur est relié métalliquement l'objet à cuivrer

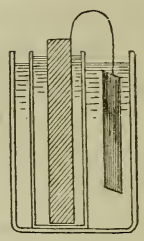


Fig. 259.

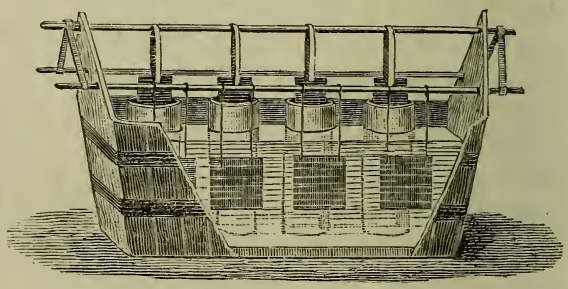


Fig. 260.

Appareils simples à galvanoplastie.

ou le moule qui est plongé dans le liquide. L'action est exactement celle qui se produit dans un élément Daniell et le cuivre se dépose sur le pôle positif, c'est-à-dire sur le moule. Dans cette opération le bain change de composition même lorsque l'on maintient la saturation à l'aide de cristaux de sulfate de cuivre, par suite de la formation d'acide sulfurique (142).

M. Weill est parvenu à obtenir des dépôts minces présentant des colorations irisées en suspendant les objets métalliques, en fer ou en acier, dans un bain de cuivre (374) par l'intermédiaire d'un fil de zinc : ces trois substances constituent une pile et le dépôt de cuivre ce produit immédiatement.

377. — Au début les piles furent seules employées pour fournir le courant nécessaire aux décompositions électrolytiques et elles servent encore dans les opérations qui n'ont pas une grande importance; on peut employer des piles d'un modèle et de dimensions

quelconques pourvu que la force électromotrice soit supérieure à la force contre-électromotrice. Il n'y a même pas à chercher à obtenir un courant très intense, car, comme nous le dirons, les dépôts métalliques ne peuvent avoir la cohésion nécessaire que si le dépôt n'est pas très rapide, et la quantité de métal déposée est proportionnelle à l'intensité du courant. On ne se préoccupe pas toujours d'ailleurs de rechercher les meilleures conditions et on se laisse guider par les indications résultant des opérations antérieures. Il serait possible cependant de déterminer avec une certaine précision les données de la question en se servant des formules (364) que nous avons indiquées plus haut[1].

On a employé des piles thermo-électriques pour produire l'électrolyse et l'on a même installé des piles contenant un grand nombre d'éléments pour les ateliers de la maison Christofle. Nous n'avons rien de particulier à dire sur l'emploi de ces piles.

378. — Mais actuellement, dans tous les ateliers présentant une certaine importance, c'est aux machines d'induction que l'on a recours pour produire le dépôt des métaux. Il va sans dire qu'il convient d'employer des machines à courants redressés ou à courants continus : on a proposé d'utiliser des modèles divers, parmi lesquels nous citerons spécialement les machines Gramme (490), les machines Siemens et Halske (492), les machines Wilde (493).

Les machines doivent être caractérisées spécialement par une très faible résistance intérieure; la force électromotrice qui doit être en rapport avec la nature de l'opération, la rapidité du dépôt, varie entre certaines limites par un changement de vitesse.

Les machines dynamo-électriques proprement dites présentent un inconvénient : si l'on vient à arrêter la machine, la force contre-électromotrice de l'auge où se produit l'électrolyse fait naître un courant de sens contraire qui venant parcourir le circuit des inducteurs change la polarité du magnétisme rémanent, de telle sorte que, à la reprise de l'action, le courant produit par la machine sera

1. Si nous appelons Π la résistance d'un élément et r la résistance totale du circuit sauf la pile, on a $R = n\Pi + r$ et de la formule (1), on tire :

$$n = \frac{0{,}0104\varepsilon E' + rp}{0{,}0104\varepsilon e - \Pi p}$$

équation qui donne n quand on connaît Π et R d'une part, constantes des appareils, et d'autre part ε et p qui correspondent à la nature du métal déposé et à la marche de l'opération.

On voit d'ailleurs que toutes choses égales d'ailleurs, on aura pour n une valeur d'autant plus petite que Π sera plus petit.

de sens opposé à celui qui existait précédemment et agira sur l'auge électrolytique pour détruire les effets précédemment obtenus et produire l'électrolyse en sens contraire. On évite cet inconvénient grave par des interrupteurs qui, à l'aide des dispositions diverses, aisées à concevoir, suppriment les communications entre la machine et l'auge électrolytique lorsque l'intensité du courant s'abaisse au-dessous de certaines limites, par conséquent lorsque la force électromotrice de la machine diminue, ou encore lorsque la vitesse de rotation est moindre qu'une valeur donnée, ce qui correspond également à une grandeur déterminée de la force électromotrice.

Cet effet d'interversion des pôles n'est pas à craindre, bien entendu, pour les machines magnéto-électriques ou pour les machines dynamo-électriques à excitatrice.

L'emploi des machines présente un avantage très notable au point de vue de l'économie; d'après des chiffres qui ont été fournis par M. Bouilhet, le prix afférent au courant électrique pour le dépôt de 1 kilogramme d'argent était de 3 fr. 87 dans la maison Christofle lorsqu'on faisait usage de piles; il est descendu à 0 fr. 94, intérêts du capital et amortissement compris, depuis qu'on fait usage de machines.

Les piles présentent l'avantage que le travail se fait sans interruption, jour et nuit, ce qui est une condition favorable pour la régularité du dépôt; il serait très coûteux de se placer dans les mêmes conditions avec des machines qui demandent une surveillance, à cause du prix élevé du travail de nuit. Dans la maison Christofle, on est parvenu à obtenir le travail continu, sans augmentation notable des dépenses, par l'emploi des accumulateurs : les accumulateurs sont chargés dans la journée par une machine spéciale et lorsque le travail cesse, le soir, ils sont mis en communication avec les bains, continuant ainsi l'action qui n'est pas interrompue.

Alors que l'on se servait de piles on pouvait toujours grouper les éléments de manière à ce que chaque pile desservît précisément une auge électrolytique; les machines que l'on emploie sont, en général, trop puissantes pour que le courant qu'elles fournissent convienne à une seule auge; il convient même, au point de vue économique, que ces machines aient la plus grande puissance possible. On associera donc plusieurs auges électrolytiques à une machine déterminée. On ne peut rien dire de général sur la disposition à adopter pour ces auges; suivant leurs dimensions, suivant les données qui caractérisent la machine, on mettra les bains en série (en tension) ou en batterie (en quantité).

Dans la maison Christofle, une machine Gramme faisant 300 tours par minute est associée à 4 bains en quantité et suffit à précipiter 600 grammes d'argent par heure.

379. — Les dispositions à prendre pour obtenir des dépôts convenables dépendent de la grandeur et de la forme des objets qu'il s'agit de recouvrir.

S'il s'agit de petits objets, on les suspend dans le bain par des fils métalliques, des fils de laiton par exemple, que l'on accroche à une ou plusieurs tringles métalliques mises en rapport avec le pôle négatif de la machine (fig. 261). Il y a, d'autre part, une ou plusieurs autres tringles métalliques mises en communication avec le pôle

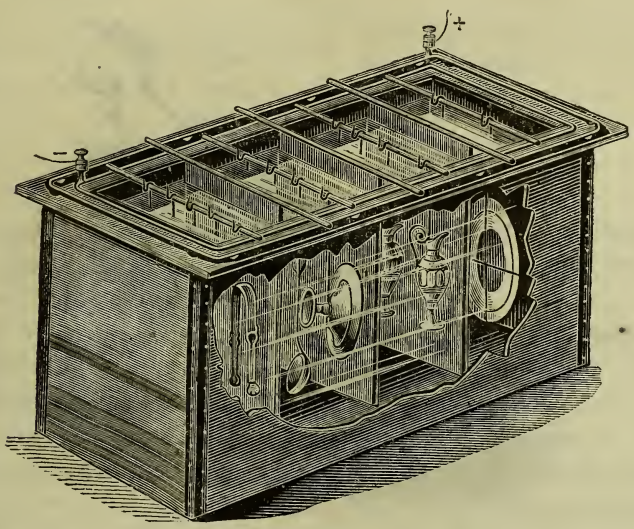


Fig. 261. — Cuve à argenture (*l'Électrolyse*).

positif de la machine et auquel on suspend les plaques métalliques qui servent d'anodes solubles et qui sont de même nature que le métal ou l'alliage que l'on veut déposer. La disposition de ces tringles, les moyens de communication avec les pôles ne présentent rien de général et varient suivant les usines.

Lorsqu'il s'agit d'objets de grandes dimensions, il faut prendre des précautions particulières; si l'anode soluble était de trop petites dimensions et disposée d'une façon quelconque, le courant ne se diffuserait pas également dans le bain et le dépôt ne serait pas uniforme. Il faut employer une anode de dimensions suffisantes (fig. 262) qui, d'une manière générale, suive la forme de l'objet sur

lequel doit être fait le dépôt de métal et reste à peu près partout à la même distance; la difficulté est réelle, s'il s'agit de déposer du métal dans un moule creux. On est parvenu à la lever en appliquant un procédé indiqué par M. Lenoir et qui consiste à faire avec des fils de platine une carcasse qu'on place dans le moule dont elle suit les principales sinuosités sans le toucher nulle part. M. Planté a remplacé cette carcasse en platine, qui était d'un prix élevé, par une autre en plomb qui est d'un prix beaucoup moindre et produit le même effet.

Dans ce cas, il n'y a plus d'électrode soluble, l'opération consiste non plus seulement dans le transport du métal, mais dans sa sépa-

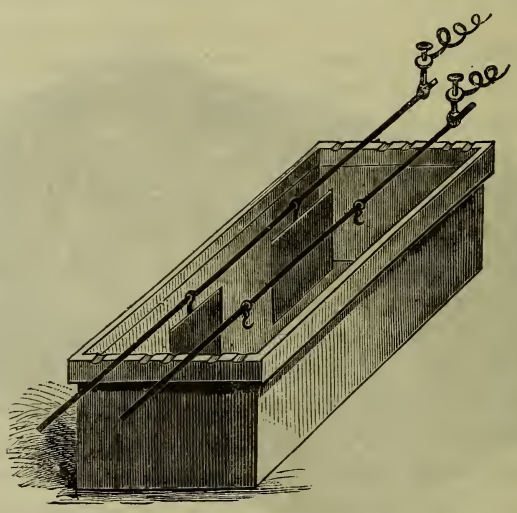


Fig. 262. — Cuve à galvanoplastie (*l'Électrolyse*).

ration du sel où il se trouve : il faut donc nécessairement une plus grande énergie dépensée, une force électromotrice plus considérable. En outre la composition du bain se modifie; pour que cette modification ne soit pas trop sensible, il faut que le moule présente une ou plusieurs ouvertures et contre-ouvertures afin qu'il s'établisse un courant qui renouvelle le liquide : ce mouvement est d'ailleurs facilité par le dégagement d'oxygène qui résulte de l'électrolyse même.

Il serait impossible de signaler toutes les précautions qu'il convient de prendre pour obtenir toujours de bons résultats : il y a une série de détails, de tours de main que la pratique seule en-

seigne et qui n'ont d'ailleurs qu'un rapport éloigné avec l'électricité.

380. — Pour que les dépôts métalliques présentent les qualités que l'on recherche, il faut qu'ils s'effectuent dans certaines conditions; si le dépôt est trop rapide, le métal ne présente aucune cohésion, il est granuleux, pulvérulent quelquefois même. L'expérience a montré que, pour le cuivre, la proportion ne doit pas dépasser 1 gramme par centimètre carré et par jour; le plus souvent on n'atteint même pas cette valeur qui correspond à environ $0^{mm},045$ d'épaisseur par heure, et l'on ne dépasse guère $0^{mm},02$ d'épaisseur par heure.

Voici d'ailleurs les résultats de quelques expériences de M. Sprague relatives à ce sujet :

Couche de	$0^{mm},003$ par heure.	Excellente couche.
—	0 ,006 —	Cuivre très tenace.
—	0 ,018 —	Très bon dépôt.
—	0 ,036 —	Bon dépôt.
—	0 ,072 —	Sablonneux sur les bords.
—	0 ,122 —	Mauvais dépôt.

L'épaisseur de $0^{mm},036$ par heure qui paraît être la limite des bons dépôts, correspond à un courant de 1 ampère par $0^{m2},0033$ de surface soit 300 ampères pour 1 mètre carré.

Encore ne faut-il pas, dans la pratique, atteindre cette valeur pour parer aux conditions défectueuses qu'il est difficile d'éviter complètement. M. Fontaine recommande de ne pas dépasser 1 ampère par décimètre carré, soit 100 ampères par mètre carré.

381. Applications diverses des dépots métalliques. — Les dépôts métalliques sont employés dans un grand nombre de circonstances et dans des buts différents : nous nous bornerons à signaler les applications les plus intéressantes.

Signalons d'abord les cas où il s'agit de reproduire un objet déterminé; c'est le cas de la galvanoplastie proprement dite. Ainsi que nous l'avons dit, on produit le dépôt sur un moule ou dans un moule en prenant, s'il est possible, les précautions nécessaires pour que le moule puisse servir de nouveau après que le métal déposé aura été retiré. On peut donner au métal une épaisseur suffisante pour qu'il présente une résistance qui l'empêche de se déformer aisément; s'il s'agit d'un objet très grand, on peut à volonté augmenter l'épaisseur du dépôt seulement aux points qui auraient les plus grands efforts à supporter. On peut d'ailleurs renforcer certaines parties, au besoin, en y coulant, par exemple, de la soudure d'étain.

Un ingénieux procédé permet de reproduire avec une extrême fidélité les objets que l'on ne tient pas à conserver; on dépose à leur surface une couche assez mince pour qu'elle ne déforme pas d'une manière appréciable les détails des objets sur lesquels elle se dépose. On détruit alors l'objet et on replonge le moulage dans le bain, après avoir recouvert sa surface extérieure d'un vernis isolant, de telle sorte qu'il se produit à l'intérieur seulement un dépôt métallique qui donne une solidité suffisante sans rien enlever à la finesse du détail. On peut opérer ainsi avec des objets en cire que l'on détruit par fusion, en argile qui tombe en poussière après une calcination suffisamment prolongée. On a appliqué le même procédé à la reproduction de plantes, de fleurs, d'animaux même.

382. — L'une des applications les plus importantes du moulage par voie galvanique consiste dans la reproduction en cuivre des gravures sur bois destinées à l'impression. Le bois s'écrase au tirage, et après un millier d'épreuves obtenues les traits perdent de leur netteté; quelquefois même, le bois se brise complètement. On y substitue avantageusement des *galvanos*. On obtient par pression sur de la cire ou sur de la gutta-percha la reproduction du bois : puis après avoir plombaginé la surface, on place ce moulage dans un bain de cuivre et on le soumet à l'action du courant : le métal se dépose, donnant un relief absolument identique au bois. Lorsque le métal a atteint une épaisseur suffisante, on le retire du bain et on coule derrière une couche de métal typographique pour lui donner de la rigidité; il ne reste qu'à le fixer sur un bloc de bois ou de métal d'épaisseur convenable pour pouvoir l'utiliser à la presse.

Non seulement le cliché ainsi obtenu est considérablement plus résistant que le bois, ce qui fait qu'on peut tirer un nombre beaucoup plus considérable d'épreuves sans le détériorer, mais, de plus, on peut obtenir autant de clichés identiques que l'on veut, ce qui permet d'obtenir un nombre indéfini d'épreuves très nettes.

On a proposé d'employer le nickel dans un but analogue et de la même façon et l'on a obtenu également des résultats favorables.

383. — Lorsque l'on dépose un métal adhérent sur un autre corps, on peut se proposer des buts différents : tantôt c'est un simple moyen d'ornementation, tantôt c'est un procédé de conservation, quelquefois même les deux buts se trouvent réunis.

Le dépôt d'un métal ou de plusieurs métaux sur un objet constitué par un autre métal permet d'obtenir des effets décoratifs par la variété des colorations; les métaux déposés doivent alors occuper une position déterminée et un espace d'une forme indiquée à

l'avance. On y arrive aisément en faisant des *réserves;* avant de plonger l'objet dans un bain métallique, on le recouvre d'un vernis isolant à l'exception des parties sur lesquelles le métal doit se déposer : on recommence l'opération autant de fois qu'il y a de métaux différents. Quelquefois l'effet décoratif provient non de la coloration même du métal, mais de modifications chimiques qu'il pourra subir sous l'influence de réactifs convenablement choisis.

Dans quelques cas la coloration n'est pas à proprement parler celle du métal déposé; si celui-ci est en couches très minces, on a alors des effets d'irisation qui sont dus aux phénomènes d'interférences qui prennent naissance dans ces lames de très faible épaisseur (Weil).

Dans quelques autres cas exceptionnels, on place l'objet non à la cathode, mais à l'anode, dans un bain contenant une dissolution de litharge dans la potasse : il se dépose alors du peroxyde de plomb qui, étant en couche mince, présente des colorations variées.

La dorure et l'argenture galvaniques ont à la fois un but décoratif et un but de préservation; ces métaux étant moins attaquables par tous les réactifs que les métaux ou alliages sur lesquels ils sont déposés, il y a réellement préservation. En outre l'effet décoratif résulte de leur couleur même d'une part et des oppositions que l'on peut obtenir suivant qu'ils sont à l'état mat ou qu'ils sont brunis. La couche que l'on dépose est fort mince, de $0^{mm},1$ à $0^{mm},001$: aussi le prix des objets ainsi obtenus, et qui présentent le même aspect extérieur que s'ils étaient en or et en argent massifs, est-il considérablement inférieur à celui des objets massifs. Il est vrai que la couche déposée s'use; mais il est toujours facile de procéder à une nouvelle opération qui ramène l'objet à l'état de neuf.

Le cuivrage et surtout le nickelage ont le plus souvent pour but la simple préservation; c'est ainsi qu'on cuivre certains objets en fonte ou en fer (candélabres, fontaines, statues, etc.). Le nickelage se généralise beaucoup pour les objets d'usage courant en fer, en laiton, etc.; on en obtient d'excellents résultats.

On est parvenu, paraît-il, à déposer le palladium par un procédé pratique; c'est également pour s'opposer à l'altération des métaux sous-jacents.

384. — Les planches de cuivre gravées qui s'usent assez rapidement par le tirage peuvent être rendues beauconp plus résistantes lorsqu'on leur a fait subir une opération inventée par M. Garnier (1857), l'*aciération;* cette opération présente d'ailleurs une grande simplicité.

On prépare un bain formé par la dissolution dans l'eau de sel ammoniac dans la proportion de 1 p. 10 du poids du liquide; on plonge dans ce bain la planche gravée que l'on fait communiquer avec le pôle négatif d'une pile et d'autre part une plaque de fer qui est mise en communication avec le pôle positif. Sous l'action du courant, il se forme un chlorure de fer ammoniacal qui est ensuite décomposé par le courant, le fer se déposant sur le cuivre.

Pour que l'opération réussisse convenablement, il faut d'une part que la planche de cuivre ait été bien décapée à la potasse, puis lavée à l'eau distillée; d'autre part il ne faut pas la placer immédiatement dans le bain; il faut d'abord y plonger le fil négatif, de manière à commencer l'action chimique, formation du chlorure de fer ammoniacal.

Le fer ainsi déposé est très dur et résiste bien à l'action de la presse; lorsque la planche s'use, ce que l'on reconnaît à l'apparition de taches rouges produites par le cuivre mis à nu, on enlève le fer en trempant la plaque dans une dissolution étendue d'acide nitrique : elle est prête alors à être aciérée à nouveau.

385. — Signalons une application très spéciale des procédés électrolytiques et qui ne rentre dans aucune des catégories précédentes : c'est l'*ajustage* des pièces de monnaie qui a été appliqué pour la première fois dans l'Inde (1873).

Lorsque les *flans*, rondelles d'or et d'argent qui constitueront les pièces monnayées après la frappe, n'ont pas le poids légal, dans les limites de la tolérance admise, on peut les ramener à ce poids d'une manière fort simple en les soumettant à un courant dans un bain d'or ou dans un bain d'argent; si les pièces sont trop lourdes, on les relie au pôle négatif et on prend une anode soluble de même métal; si elles sont trop légères, on les relie au pôle positif et le métal sera transporté sur la cathode.

On prend soin de réunir pour une même opération toutes les pièces pour lesquelles l'erreur est la même et on arrête l'opération quand le métal enlevé ou déposé a atteint un poids égal à celui qu'on peut calculer à l'avance; en suspendant les pièces à une balance convenablement tarée, on peut arrêter l'opération automatiquement en faisant que le courant soit rompu lorsque la balance vient à s'incliner.

On peut réunir avantageusement les deux opérations en mettant à l'anode des pièces trop légères, et à la cathode un nombre égal de pièces présentant un excès de poids égal au déficit des autres; la justification se fera à la fois sur les deux séries qui seront ramenées en même temps au poids légal.

386. — Il n'est pas sans intérêt de signaler que, par le dépôt galvanique, on peut communiquer aux métaux des propriétés qu'ils ne possèdent pas au même degré lorsqu'ils ont été préparés par une autre voie; c'est ce qui résulte, par exemple, spécialement de recherches qui ont été faites sur le cuivre par M. Bouilhet (1866) et par M. Wurtz.

Le premier, soumettant des plaques de cuivre à l'action de pressions croissantes, reconnut que le cuivre de fusion laisse suinter l'eau à la pression de 12 atmosphères tandis que, à la pression de 20 atmosphères, l'eau ne passait pas à travers le cuivre obtenu par la voie galvanique.

D'autre part, le second a trouvé pour la densité du cuivre galvanique des valeurs comprises entre 8,905 et 8,910, tandis qu'elles étaient seulement de 8,780 à 8,850 pour le cuivre fondu; ce qui corrobore bien les résultats précédents en donnant l'idée d'un métal plus compact. Mais, comme nous l'avons dit, ces qualités dépendent beaucoup de la rapidité du dépôt.

387. Affinage des métaux. — Depuis quelques années, on a employé l'électrolyse à la séparation de métaux différents, à la purification d'autres métaux; c'est là ce qui constitue l'opération que l'on désigne sous le nom *d'affinage*.

L'affinage électrolytique du cuivre est maintenant une opération absolument industrielle qui est appliquée dans un certain nombre d'usines sur une grande échelle.

L'opération est théoriquement très simple; c'est de la galvanoplastie dans laquelle on ferait usage d'anodes solubles impures; le métal pur du bain se dépose et est remplacé dans le bain par du métal pur de l'anode, tandis que les impuretés tombent au fond ou restent en suspension.

On prend pour anodes des plaques de cuivre rosette contenant encore 2 à 3 p. 100 de matières étrangères au maximum; comme nous l'avons dit d'une manière générale, l'énergie à dépenser sera d'autant plus considérable que les matières étrangères se trouveront en plus grande proportion.

Nous citerons quelques chiffres relatifs à l'affinage tel qu'il est exécuté à Oker, où se trouve l'une des plus anciennes usines. On emploie des machines Siemens et Halske; chacune a une force électromotrice de 3 volts en moyenne et une résistance de $0^{ohm},00075$; elle alimente dix ou douze grandes cuves placées parallèlement dans le circuit (en quantité). Une machine nécessite une puissance de 8 à 10 chevaux et dépose par jour 250 à 300 kilogrammes de cuivre

très pur, soit environ 1 kilogramme par cuve et par heure; ce dépôt de 1 kilogramme par heure correspond donc à peu près à la puissance de 1 cheval.

Ce dernier chiffre varie beaucoup avec les circonstances, conditions d'installation, nature et proportion des impuretés, etc., car M. Fontaine cite comme correspondant à la puissance de 1 cheval vapeur des poids de cuivre déposé par heure qui sont 0,67 — 2,65 — 3,12 suivant les usines.

Le métal obtenu par l'affinage électrolytique, par suite de sa pureté, présente des qualités particulières; il se travaille plus facilement, exige moins de recuit; mais surtout il présente une grande conductibilité électrique qui le rend précieux comme conducteur et pour la construction des machines.

M. Fontaine, qui a fait une étude très complète de cette question, ne paraît pas penser que, dans les conditions actuelles, l'affinage du cuivre, à proprement parler, puisse donner lieu à une industrie rémunératrice; les résultats ne sont avantageux que par suite des sous-produits provenant de l'opération, notamment par les métaux précieux, or et argent, qui existent en proportion minime, il est vrai, dans le cuivre soumis à l'affinage, mais qui n'en constituent pas moins une valeur réelle.

Quoi qu'il en soit, un certain nombre d'usine fonctionnent actuellement en France, en Angleterre et en Allemagne, bien que cette industrie soit d'origine récente.

388. — L'électrolyse a été appliquée également pour extraire l'or et le platine qui peuvent se trouver en petites proportions dans certains alliages ; ce procédé a été employé notamment lors de la refonte des monnaies de billon en Allemagne.

L'alliage contenait de l'or, du platine, de l'argent et du cuivre : il fut traité par l'acide sulfurique : les deux derniers métaux entrèrent en dissolution. L'or et le platine restèrent alliés ensemble, on les réduisit en plaques que l'on employait comme anode soluble dans un bain d'or analogue aux bains de dorure et traversé par un courant. Sous l'influence du courant, l'or pur se dépose à la cathode tandis que le platine reste en dissolution.

On obtient ainsi un métal très pur; dans l'opération à laquelle nous faisons allusion et dans laquelle on put recueillir 23 kilogrammes d'or, le métal obtenu était d'une pureté parfaite, au titre de $\frac{1000}{1000}$.

De l'argent obtenu par une méthode analogue présentait le titre de $\frac{999,7}{1000}$.

Nous signalerons encore l'affinage du plomb qui s'exécute d'après le procédé indiqué par Keith. Le plomb à purifier sert d'anode soluble dans un bain formé par une dissolution de sulfate de plomb dans l'acétate de plomb ; on fait passer le courant : l'or, l'argent, l'antimoine restent dans l'anode, le plomb se dissout dans le liquide au fur et à mesure que le plomb de la dissolution se dépose sur la cathode.

Le plomb ainsi obtenu ne serait pas pur, paraît-il ; il contiendrait encore du bismuth.

389. Électro-métallurgie. — L'électrolyse des liqueurs salines a été proposée et même appliquée, au moins dans une certaine mesure, pour extraire le zinc métallique de ses minerais (Parodi et Mascazzini, 1880; Létrange, 1881).

Les minerais du zinc sont le sulfure ou *blende* et le carbonate ou *calamine*. La blende grillée à l'air donne du sulfate de zinc; il faut traiter la calamine par l'acide sulfurique pour avoir le même sel.

Le sulfate de zinc obtenu est dissous dans l'eau et traité par le courant; on prend pour électrode négative une lame de zinc mince et pour anode une lame de plomb. Le zinc réduit par le courant se dépose sur la cathode ; sur l'anode il y a production d'acide sulfurique : c'est cet acide mis en liberté qui peut être utilisé à nouveau pour attaquer la calamine.

Les minerais contiennent d'autres substances, notamment du plomb, de l'argent, du fer. Les deux premiers métaux ne sont pas attaqués par l'acide sulfurique, ils restent comme résidus de la première opération, on peut les traiter à part. Le fer est entraîné dans la dissolution; mais il paraît qu'il passe à l'état d'oxyde, se réunit à l'anode et tombe au fond du vase où se fait l'opération.

390. — L'électricité a été appliquée dans d'autres conditions encore à l'extraction des métaux de leurs minerais; peut-être y a-t-il pour l'avenir une méthode générale, bien que pour l'instant elle ne soit appliquée que d'une manière fort restreinte. Nous voulons parler des procédés inventés par M. Marchese et exploités par la Société électro-métallurgique de Gênes. Ces procédés ont pour but d'extraire le métal directement de la matte de cuivre; il ne sont pas applicables d'ailleurs, au moins sous cette forme, à des minerais quelconques.

Les mattes cuivreuses sont obtenues par la fusion des minerais qui comprennent des sulfures divers de cuivre et de fer : elles contiennent même quelquefois du cuivre métallique. Ces mattes conduisent bien l'électricité, ce qui est une condition nécessaire au

succès de l'opération. Si on les emploie comme anodes dans un bain constitué par une dissolution de sulfate de cuivre et dans lequel la cathode est une lame de cuivre, elles se décomposent facilement; une force électromotrice inférieure à 1 volt suffit, paraît-il; elle est inférieure à celle qui est nécessaire à la décomposition du sulfate, d'après les recherches de M. Marchese.

Les mattes sont obtenues directement en fondant les minerais et les coulant dans des moules de manière à obtenir des plaques carrées de $0^m,80$ de côté sur $0^m,03$ d'épaisseur; elles sont placées dans des cadres métalliques qui assurent un bon contact avec les conducteurs.

Les cathodes sont formées par des plaques de cuivre minces sur lesquelles se déposera le métal. Le bain électrolytique contient du sulfate de cuivre que l'on obtient en grillant à l'air les minerais et les mattes très riches, et traitant les résidus par l'acide sulfurique étendu. Il est nécessaire que le liquide circule d'une manière continue dans les bacs; il faut d'autre part qu'il conserve une certaine proportion de persulfate de fer qui assure la bonne qualité du métal déposé, probablement en absorbant l'hydrogène qui pourrait résulter de l'électrolyse du liquide.

A l'usine de Sestri-Levante, qui utilise le procédé que nous venons d'indiquer rapidement, il y a vingt machines dynamo-électriques Siemens; chacune est reliée avec douze bacs en tension; elle fournit un courant de 400 ampères avec une différence de potentiel de 11 volts aux bornes de la machine et peut produire 100 kilogrammes de cuivre par vingt-quatre heures.

Cette méthode donne naissance à des produits secondaires importants qui peuvent être utilisés dans les fabriques de produits chimiques, notamment du soufre et du sulfate de fer cristallisé; ces corps ont une valeur réelle et constituent un bénéfice important.

391. — On a cherché à appliquer l'action électrolytique des courants dans d'autres circonstances, mais on ne paraît pas être arrivé à des méthodes pratiques et économiques; aussi nous ne nous y arrêterons pas et nous signalerons seulement l'application des courants pour faciliter l'amalgamation dans le traitement des minerais d'or et d'argent. Ces minerais convenablement réduits en fragments ou pulvérisés sont agités au contact du mercure en présence de l'eau. L'opération est entravée par suite des impuretés qui viennent souiller le mercure et ralentissent son action sur l'or et l'argent. On évite cet inconvénient en faisant agir un courant, le mercure communiquant avec le pôle négatif et l'eau avec le pôle positif; les

impuretés abandonnent le mercure dont la surface reste nette, ce qui facilite l'amalgamation.

Il semble qu'il y ait là simplement électrolyse du liquide aqueux : l'hydrogène se porte au pôle négatif et réduit les composés qui ont pu se former et salissent la surface du mercure.

392. Préparation électrolytique du magnésium et de l'aluminium. — Ce mode de préparation qui est intéressant ne paraît pas être encore entré dans la pratique; c'est une séparation électrolytique du métal qui présente la particularité qu'elle a lieu à une température assez élevée pour amener à l'état liquide les corps sur les quels on opère, tandis que dans les cas précédents, l'état liquide est obtenu par dissolution.

Le magnésium s'obtient facilement, paraît-il, par l'électrolyse de la carnallite (chlorure double de potassium et de magnésium hydraté) (Reichardt), à la condition de faire passer sur le bain ou même dans le bain en fusion un courant de gaz inertes ou de gaz réducteurs.

Grœtzel a indiqué l'emploi du chlorure d'aluminium pour l'obtention de ce métal, en opérant d'une façon analogue; mais il ne semble pas que toutes les difficultés aient encore été levées.

393. Analyse et dosage électrolytiques. — L'électrolyse permet dans un certain nombre de cas de faire des essais, des dosages plus rapidement que par les procédés ordinaires de la chimie et d'obtenir la séparation de métaux qui sont difficilement séparables par les réactifs usuels. Bien que ces procédés soient fort simples en somme, ils ne sont pas encore employés autant qu'il semble qu'ils devraient l'être d'après les résultats avantageux qu'en ont obtenus ceux qui s'en sont servi.

La méthode est très simple et le dispositif ne présente pas de complication réelle. Il faut avoir une pile susceptible de donner un grand débit sans se polariser : des éléments Daniell à grande surface conviennent parfaitement, il semble que 6 éléments montés en tension peuvent servir dans la plupart des cas. Le circuit doit contenir un galvanomètre (apériodique pour plus de facilité) auquel on adapte un shunt permettant de lui faire donner des indications se rapportant à des courants d'intensité très différentes, entre un micro-ampère et cinq ampères, par exemple. Les éléments doivent être reliés par un commutateur permettant de prendre seulement le nombre d'éléments réclamé par l'opération.

On peut également employer des piles thermo-électriques qui présentent aussi peu de résistance intérieure et que l'on peut ai-

sément fractionner à volonté, obtenant telle force électro-motrice que l'on désire, à cause de la faible différence de potentiel produite par un élément.

Enfin on peut encore faire usage d'une machine d'induction dont on fait varier la force électro-motrice en changeant la vitesse.

Le liquide à analyser est placé dans un creuset ou une capsule de platine posé sur un support isolant et qui, mis en rapport avec le pôle négatif de la pile sera la cathode ; c'est sur cette électrode que se fait le dépôt métallique dont il faudra déterminer le poids avec les précautions ordinaires. L'anode est constituée par un fil ou une tige de platine communiquant avec le pôle + de la pile. On pourrait employer également un creuset ou une capsule que l'on placerait concentriquement au vase contenant le liquide qui serait ainsi renfermé dans un espace annulaire. Enfin M. Riche prend pour anode double d'une part le vase extérieur, d'autre part une tige de platine placée au centre ; la cathode est constituée par une toile de platine présentant la forme d'un cylindre circulaire que l'on place concentriquement entre le vase et la tige centrale ; c'est sur cette toile que se fait le dépôt.

Dans un grand nombre de cas, il est bon de chauffer le vase qui contient l'électrolyte pour diminuer la résistance du liquide.

L'opération conduisant à déposer une petite quantité de métal, quelques décigrammes en plusieurs heures, le courant n'a pas besoin d'être très intense.

Les liquides à employer pour faire le dosage d'un métal déterminé ou la séparation de divers métaux varient suivant la nature des corps qu'il s'agit de mettre en liberté, il n'y a rien de général à signaler et le choix dépend seulement de considérations chimiques ou à peu près, la seule condition imposée au point de vue électrique c'est que le liquide soit conducteur de l'électricité[1].

394. Blanchiment électrique. — Bien que la théorie du blanchiment par les hypochlorites ou chlorures décolorants soit encore soumise à la discussion, une des idées qui paraissent des plus en concordance avec les faits est celle qui n'attribue au chlore qu'un rôle indirect dans ce cas, celui de mettre de l'oxygène en liberté, l'oxygène étant vraiment le corps décolorant. Cette théorie paraît justifiée, d'ailleurs, par les réactions qui semblent se produire dans le système de blanchiment par l'électricité qui a été présenté à l'Exposition d'Anvers par la Société électro-chimique de MM. Scrive, Hermite et Cie.

1. Voir *Bull. de la Soc. chim. de Paris*, 1885. *Electricien*, 1884.

Voici l'explication que M. Hermite a donné de son procédé.

« Soumis à l'action du courant électrique, deux équivalents de chlorure de magnésium sont décomposés en même temps que l'eau : le magnésium se porte au pôle négatif, décompose l'eau pour s'oxyder et former de la magnésie tandis que l'hydrogène se dégage avec celui de la décomposition de l'eau. Le chlore se porte au pôle positif où il s'oxyde avec l'oxygène de l'eau décomposée pour former de l'acide hypochlorique ; mais cet acide en présence d'une base, la magnésie, se dédouble immédiatement en acide chloreux et en acide chlorique qui se combinent avec la magnésie libre pour former du chlorite et du chlorate de magnésie lesquels sont décomposés par le courant avant le chlorure de magnésium restant au bain, leur chaleur de combinaison étant moins élevée que celle de ce dernier sel.

« Le magnésium se porte de nouveau au pôle négatif et s'oxyde en décomposant l'eau, tandis que les acides chloreux et chlorique sont mis en liberté, et, s'ils sont en présence d'une matière organique, lui cèdent de l'oxygène pour former de l'acide chlorhydrique qui se combine avec la magnésie en liberté, pour régénérer le chlorure de magnésium primitif. »

On obtient ainsi un cycle complet dans lequel le chlore sert simplement de véhicule pour fixer de l'oxygène, emprunté à l'eau, sur la matière organique.

On peut représenter la réaction par les formules suivantes :

$$2MgCl + 10HO = 2MgO + 2ClO^4 + 10H$$
$$2MgO + 2ClO^4 = MgOClO^3 + MgOClO^5 = ClO^3 + ClO^5 + 2Mg + 2O$$
$$= 2Cl + 2MgO + 8O$$
$$Cl + HO + MgO = HCl + O + MgO = MgCl + HO + O.$$

La méthode de blanchiment dont il s'agit repose sur l'action d'un courant électrique sur une dissolution aqueuse de chlorure de magnésium ; les électrodes sont insolubles et n'agissent point dans les réactions. Le chlorure de magnésium est régénéré de telle sorte que la dépense est seulement celle qui correspond à la production du courant.

La substance à blanchir est placée directement dans le bain ; elle joue un rôle important dans la réaction ; car si on électrolyse le bain seul, il se dégage du chlore et on recueille de la magnésie sur l'électrode négative, tandis que rien de semblable ne se manifeste en présence d'une matière comme du sulfate d'indigo. Pour que l'opération réussisse complètement, il convient que le liquide soit soumis constamment à l'agitation.

M. Lebedoer a étudié la question en comparant l'effet produit à celui des hypochlorites ; il est arrivé à ce résultat que l'action d'un courant de 1 ampère pendant une heure est équivalente à celle d'une quantité d'hypochlorite capable de dégager un volume de chlore variable suivant les circonstances de $1^{l},50$ à $2^{l},75$: dans ses espériences M. Lebedoer employait une force électromotrice de 3 volts : M. Hermite indique pour la force contre-électromotrice la valeur de $2^{v},13$.

Nous n'entrerons pas dans le détail de la forme des appareils qui peut varier suivant les circonstances ; nous dirons seulement que les électrodes sont en zinc et que M. Hermite conseille d'intervertir le courant de temps à autre et pendant quelques instants de manière à détacher de l'électrode la petite quantité de magnésie qui aurait pu se former et y rester adhérente.

395. Rectification des alcools. — Nous avons dit que lorsque le courant agit sur des substances composées autres que des sels métalliques les actions qui se produisent sont fort complexes et que, jusqu'à ce jour, on n'a pas encore découvert les lois auxquelles elles obéissent. Il n'y en a pas moins quelques applications intéressantes à signaler. Tel est, par exemple, le procédé de rectification des alcools mauvais goût, procédé dû à MM. Naudin et Schneider et qui a donné de bons résultats dans l'usine de M. G. Boulet, à Rouen.

Tandis que certains alcools impurs peuvent être rectifiés par la distillation précédée, au besoin, d'un filtrage sur du charbon ou d'actions chimiques diverses, il en est sur lesquels ces moyens n'agissent pas suffisamment pour enlever les matières étrangères, aldéhydes ou alcools supérieurs, qui sont l'origine de ce mauvais goût. MM. Naudin et Schneider ont montré que, dans des conditions convenables, l'action de l'électricité peut amener la destruction ou la transformation de ces produits étrangers. Ils soumettent les flegmes à une action hydrogénante, et, au besoin, ensuite, à une action oxygénante, ces actions étant, dans l'un et l'autre cas, dues à l'électricité.

Pour obtenir l'hydrogénation, ils soumettent les flegmes (alcools impurs) directement à l'action de couples zinc-cuivre. Voici comment ils opèrent : Dans une cuve qui est traversée par un courant plus ou moins rapide du liquide, on dispose des lames de zinc placées horizontalement et percées de trous pour faciliter le dégagement des gaz : on fait arriver d'abord dans la cuve une dissolution de sulfate de cuivre dans des flegmes et on l'abandonne pendant 24 heures ; dans ces conditions et si la température ne dépasse pas

20 à 25° le cuivre forme un dépôt brun chocolat assez adhérent dès le début, l'opération doit être répétée cinq fois, le couple est alors formé; on retire la dissolution de sulfate et on introduit les flegmes à rectifier qui séjournent dans l'appareil de 6 à 48 heures. Sous l'influence du couple zinc-cuivre il se forme de l'oxyde de cuivre et de l'hydrogène qui à l'état naissant est absorbé au moins en partie; cette opération semble avoir pour effet de transformer les aldéhydes. Il convient d'ajouter de temps à autre une petite quantité d'acide chlorhydrique qui dissout l'oxyde de cuivre qui se dépose en couche blanchâtre sur les couples, cette précaution maintient le métal à nu, ce dont on s'aperçoit par la conservation de sa couleur, à la condition de répéter de temps à autre l'action du sulfate de cuivre.

L'hydrogénation terminée, les flegmes sont envoyés au rectificateur à colonnes.

Cette opération ne suffit pas dans tous les cas et doit être suivie d'une oxydation par électrolyse pour certaines natures de flegmes, notamment pour les flegmes de betteraves qui conservent un léger goût désagréable après l'action des couples zinc-cuivre. Les flegmes additionnés d'acide chlorhydrique sont placés dans un réservoir d'où ils partent pour traverser sous l'influence de la pression les voltamètres ou électrolyseurs.

Un appareil électrolyseur (fig. 263) se compose d'un vase cylindrique A en verre fermé à sa partie inférieure; sur le bord supérieur repose un épais couvercle en bois faisant joint hermétique; ce couvercle isolant laisse passer le tube B d'amenée et le tube C de sortie ainsi que les électrodes en cuivre E, E′ reliés par des fils métalliques au circuit général traversé par le courant que fournit une machine dynamo-électrique. Le tube de sortie d'un électrolyseur se trouve relié par un manchon de caoutchouc au tube d'arrivée de l'électrolyseur voisin. Suivant la nature des flegmes à traiter, on accouple un plus ou moins grand nombre d'électrolyseurs et l'on fait varier la vitesse d'écoulement.

Dans ces conditions l'oxygène dégagé brûle les corps qui sont la cause du mauvais goût : il paraît d'ailleurs se faire une hydrogénation ultérieure (telle est du moins l'explication donnée par M. Naudin), hydrogénation qui se complète dans une dernière opération où le liquide est désacidulé par son contact avec du zinc. Les flegmes sont alors envoyés au rectificateur à colonnes.

Il n'y a pas lieu d'insister ici sur l'augmentation du rendement, non plus que sur les avantages hygiéniques que présente la destruc-

tion, dans les alcools livrés à la consommation, des produits étrangers dont plusieurs semblent toxiques.

396. Fabrication de matières tinctoriales. — Certaines matières organiques en dissolution soumises à l'action du courant donnent naissance à des composés nouveaux qui peuvent être utilisés. M. Goppelsrœder a proposé d'appliquer cette action à la fabrication de matières colorantes, et à la teinture même. D'après lui, les

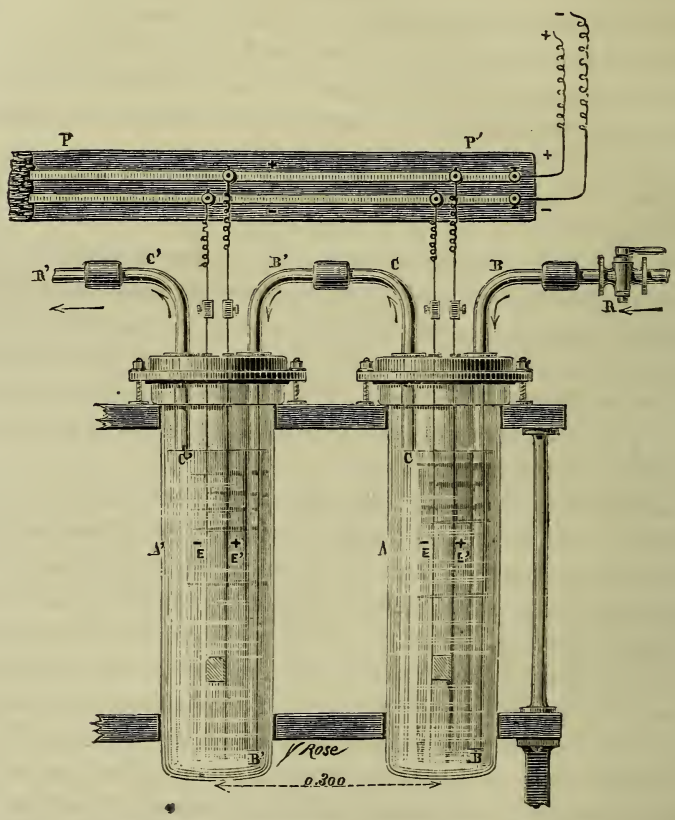


Fig. 263. — Voltamètre pour la rectification des alcools, système Naudin et Schneider.

actions qui se manifestent ne sont pas produites directement par l'action du courant sur les substances en expérience, mais par les actions secondaires dues aux corps qui se dégagent par l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène ou l'oxygène à l'état naissant agissent sur la matière colorante et la transforment en donnant naissance dans le voisinage des électrodes à des produits qui peuvent être utilisés. Il faut employer des procédés particuliers pour éviter que les subs-

tances ainsi obtenues ne se mélangent par diffusion dans le liquide; pour parer à cet inconvénient on peut placer les électrodes dans deux vases séparés réunis par une mèche poreuse faisant siphon; on peut plus commodément mettre un vase poreux dans une cuve et verser du liquide à l'intérieur et à l'extérieur, une électrode se trouvant dans le vase poreux, une autre à l'extérieur.

M. Goppelsrœder a pu obtenir de cette façon le noir d'aniline, par exemple, en électrolysant une dissolution aqueuse de chlorhydrate d'aniline acidulée d'un peu d'acide sulfurique; des bleus d'aniline par l'électrolyse des chlorhydrates de méthylaniline, de diphénylamine et de méthyldiphénylamine, etc. Il a même réussi à teindre directement des étoffes ou du papier; pour cela, il imbibe l'étoffe d'une dissolution de chlorhydrate d'aniline, par exemple; il la place sur une plaque métallique inattaquable en communication avec une des bornes d'une machine; sur l'étoffe, il pose une planche métallique inattaquable également et présentant en relief le dessin à reproduire et il la fait communiquer avec l'autre borne. En faisant passer le courant pendant un temps très court on obtient la reproduction du dessin en noir.

Si la planche en relief est remplacée par une pointe en métal ou en charbon reliée à la borne de la machine, on peut écrire ou dessiner et obtenir une fixation indélébile de la matière colorante sur les points où la pointe passe.

Si on veut teindre l'étoffe en entier, il faut commencer par y produire un dépôt très mince d'un métal qui la rend conductrice, on la fait communiquer avec le pôle positif de la machine et on la plonge dans le bain où se trouve l'autre électrode placée dans le voisinage; le noir se formera et se fixera sur la fibre même du tissu.

On peut, dans certains cas, obtenir le rongeage de la couleur de manière à produire un dessin blanc sur fond coloré; l'opération réussit bien avec le rouge turc ou le bleu indigo. On imprègne le tissu teint uniformément avec une dissolution contenant du salpêtre et du sel marin; puis, comme ci-dessus, on met l'étoffe entre deux planches métalliques et l'on fait passer le courant, il se produit à l'électrode positive de l'acide azotique et du chlore qui rongent, détruisent la couleur.

Enfin, M. Goppelsrœder applique le même procédé à la préparation des cuves d'indigo; il se sert du double vase déjà décrit qu'il remplit d'un liquide obtenu en dissolvant de l'indigo finement broyé dans une dissolution de potasse caustique; on fait passer le courant pendant trois ou quatre heures; il se produit un dégage-

ment violent d'hydrogène et l'indigo bleu se transforme en indigo blanc par réduction. Le coton plongé dans la cuve, puis abandonné à l'air est teint en bleu comme dans les cuves ordinaires.

397. Des effluves électriques. — On appelle *effluves électriques* les décharges qui se produisent entre des corps électrisés dans des conditions telles que la quantité d'électricité soit très faible, de sorte qu'il ne se produit ni effets lumineux, ni effets calorifiques comme ceux qui accompagnent l'étincelle, ou du moins ces effets sont très faibles. Les actions chimiques ne se manifestent pas non plus comme pour l'étincelle ou le courant, c'est-à-dire au bout d'un temps assez court; elles n'en existent pas moins mais ne se produisent qu'à la longue en donnant naissance à des effets très intéressants, notamment à des combinaisons qui ne se produiraient pas sans leur influence.

Les appareils producteurs d'effluves sont assez fréquemment employés dans les laboratoires pour des recherches de chimie orga-

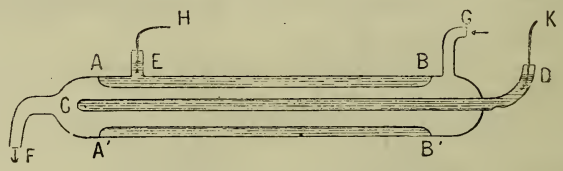


Fig. 264. — Tube à effluves de Thénard.

nique. En principe, ils sont tous basés sur la même idée : deux conducteurs métalliques mis en communication avec les deux pôles d'une pile ou plus souvent avec les bornes d'une bobine d'induction et séparés par un corps isolant comme une lame de verre. Malgré la présence de cette substance isolante, il s'établit un passage d'électricité d'un conducteur à l'autre, passage qui constitue l'effluve; c'est sur le trajet de cet agent qu'on place les corps sur lesquels on veut agir.

L'appareil de Siemens est formé de deux tubes de verre concentriques entre lesquels on fait passer les gaz; des feuilles d'étain sont collées à la surface externe du large tube et à la surface interne du tube central; ces feuilles d'étain communiquent chacune avec une des bornes de la machine.

Dans l'appareil de Thénard (fig. 264) les feuilles d'étain sont remplacées par des lames de mercure AB, CD maintenues entre des tubes de verre placés concentriquement et convenablement soudés.

M. Berthelot a employé diverses dispositions dans lesquelles on retrouve les même éléments; on peut varier la forme des appareils suivant l'expérience que l'on a en vue.

Citons l'appareil de M. Houzeau (fig. 265) qui est simple : il est constitué par un tube de verre mince AB qui est traversé lentement par le gaz sur lequel on veut agir : à l'intérieur se trouve un fil de platine CD communiquant avec une des bornes de la bobine d'induction, tandis que l'autre borne est mise en rapport avec une spirale EF d'un fil de cuivre ou de platine qui entoure extérieurement le tube; quand la bobine fonctionne le tube est traversé par les effluves.

Sous l'influence de l'effluve on obtient la transformation d'oxygène en ozone, ou plus exactement on obtient de l'oxygène ozonisé, une portion de l'oxygène seulement subissant la transformation.

M. Berthelot a obtenu par la même action la condensation de corps composés, comme l'acétylène qui a donné des polymères

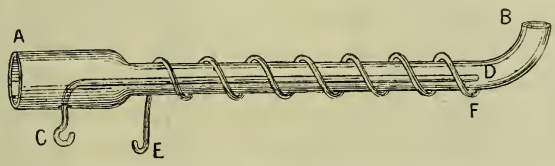


Fig. 265. — Tube à effluves de M. Houzeau.

solides ou liquides. Le cyanogène se transforme de même en paracyanogène.

L'effluve donne lieu à des combinaisons; sous son influence un mélange d'hydrogène et d'azote se combine en partie et il se forme de l'ammoniaque; on a pu atteindre la proportion de 3 p. 100 de ce corps. L'hydrogène se combine avec l'oxyde de carbone, avec la benzine, l'essence de térébenthine. L'azote, sous l'action de l'effluve, se combine avec de nombreux corps organiques et il est naturel de se demander s'il ne se produit pas des actions analogues sous l'influence de l'électricité atmosphérique. Des oxydations peuvent également avoir lieu : elles ont conduit à la découverte de l'acide persulfurique, de l'acide pernitrique, etc.

L'effluve produit également des décompositions; elle agit dans ce sens, par exemple, sur l'acide sulfhydrique, sur l'oxyde de carbone, sur l'acide carbonique, etc., en fournissant souvent des produits intéressants.

CHAPITRE II

LES ACTIONS CALORIFIQUES ET LES COURANTS

398. — Comme pour les actions chimiques, nous avons à considérer ici tant les courants produits par les actions calorifiques que les actions calorifiques produites par les courants, cette étude étant faite au point de vue des applications.

Nous avons peu de choses à signaler pour la première partie de cette étude : les piles thermo-électriques qui représentent les seules applications dans ce sens ne semblent pas, au moins jusqu'à présent, devoir jouer un rôle dans l'industrie; aussi nous nous bornerons à décrire un nouveau modèle qui est appelé à rendre des services dans les laboratoires.

Par contre, nombreuses sont les applications des effets calorifiques produits par les courants, nombreuses et importantes puisqu'elles comprennent, entre autres, l'éclairage électrique, question à laquelle nous avons cru devoir nous arrêter assez longuement, et à côté de laquelle les autres applications paraissent, quant à présent, d'un intérêt minime.

Mais il est quelques cas dans lesquels la production du courant n'est pas le but direct que l'on se propose, d'autres dans lesquels l'action de la chaleur ne crée pas le courant, mais le modifie seulement. Il y a quelques applications qui, bien que ne rentrant pas absolument dans le sujet de ce chapitre, seraient difficiles à classer ailleurs rationnellement; nous les décrirons donc à la suite de la pile thermo-électrique.

399. Pile thermo-électrique de MM. Clamond et Carpentier.— Ce nouveau modèle de pile thermo-électrique destinée à être chauffée au gaz ne présente, au fond, aucune idée nouvelle; mais la disposition en est commode, et grâce à des perfectionnements dans

sa forme et dans son mode de fabrication elle paraît être d'un emploi véritablement pratique.

Les couples sont constitués par un métal (fer ou nickel) et un alliage (antimoine-zinc) préparé spécialement et auquel on arrive à donner une composition constante.

Une disposition toute spéciale consiste dans l'emploi de pièces

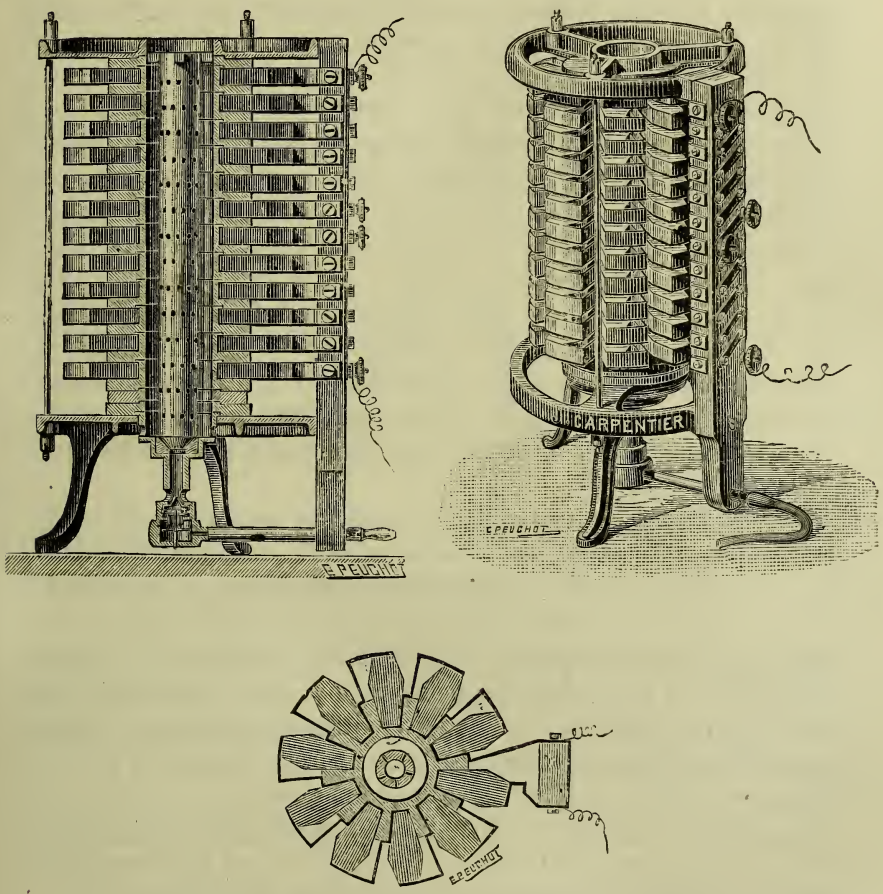


Fig. 266, 267, 268. — Pile thermo-électrique de Clamond (*Carpentier*).

minces en terre réfractaire que l'on empile les unes au-dessus des autres et qui, présentant au centre une partie circulaire évidée, sont constituées à la périphérie par des cloisons limitant des cavités ou alvéoles ouvertes extérieurement. Chacune de ces alvéoles renferme un couple que l'on construit sur place : le métal, fer ou

nickel, est fixé préalablement à la position qu'il doit occuper et l'on coule l'alliage fondu qui se solidifie par refroidissement sur place.

Un brûleur à gaz spécial est disposé à la partie inférieure de la cheminée formée par l'ensemble des parties circulaires centrales et la combustion se fait de telle façon que l'on ne peut atteindre la température de fusion de l'alliage; si, par hasard, cet accident se produisait, il serait de peu d'importance, puisque, par le refroidissement, l'alliage reprendrait sa forme primitive en se solidifiant.

Les éléments d'une même couronne sont montés en série; on superpose plusieurs couronnes pour former une pile : les pôles de chaque couronne aboutissent à des bornes et l'on peut aisément établir entre les diverses couronnes telles combinaisons que l'on désire.

On a établi deux modèles différents : le premier comprend cent-vingt éléments petit module répartis en douze couronnes; en marche normale, sa force électro-motrice est de 8 volts, sa résistance de 3, 2 ohms. Le second modèle comprend soixante éléments grand module répartis en six couronnes; en marche normale sa force électro-motriee est de 3, 6 volts et sa résistance de 0, 65 ohm.

La dépense de gaz est la même dans les deux modèles, 180 litres à l'heure.

400. Des aiguilles thermo-électriques. — Nous avons dit (166) que l'on peut utiliser la pile thermo-électrique comme thermomètre et principalement comme thermomètre différentiel : la pile de Melloni qui se prête très bien à cet usage pour certaines expériences, comme celles qui se rapportent à la chaleur rayonnante, est inapplicable dans d'autres cas. On peut employer des appareils d'une forme un peu différente, mais basés sur le même principe comme les aiguilles thermo-électriques qui servent fréquemment en physiologie pour évaluer des différences de température.

Un système d'aiguilles thermo-électriques se compose essentiellement de deux éléments formant un circuit avec un galvanomètre; mais les aiguilles sont montées *en opposition* de telle sorte que : 1° le courant indiqué par le galvanomètre est dû à la différence des actions des deux éléments, que son intensité est liée à la différence des températures, puisque la force électromotrice d'un élément dépend de la température; et que, 2° en particulier, le courant est nul, le galvanomètre reste au zéro, si les forces électromotrices sont égales c'est-à-dire si les deux températures sont égales.

La disposition la plus simple et la meilleure consiste à avoir un

fil de fer dont la longueur dépend de la distance des points que l'on veut étudier et que l'on réunit à ses deux extrémités à deux fils de cuivre qui, eux-mêmes, d'autre part, aboutissent au galvanomètre. Avec cette disposition, il n'y a nulle part contact de métaux hétérogènes, si ce n'est aux points mêmes où le fer se réunit au cuivre.

Lorsque les aiguilles doivent pénétrer dans des corps présentant une certaine résistance, on peut leur donner la forme qui a été indiquée par Becquerel. On soude sur une certaine longueur le fer AB (fig. 267) et le cuivre AC placés parallèlement et on use l'extrémité A sur une meule de manière à obtenir une pointe aiguë, que l'on peut enfoncer sans difficulté dans les muscles, par exemple. M. d'Arsonval emploie une autre disposition ingénieuse, les deux métaux au lieu d'être placés parallèlement sont concentriques ayant été étirés à la filière jusqu'à être assez fins pour pouvoir

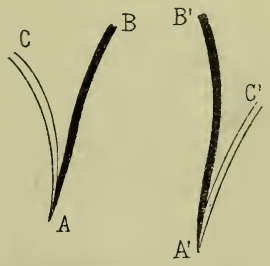


Fig. 269. — Aiguilles thermo-électriques.

pénétrer aisément dans les tissus : d'après M. d'Arsonval, cette disposition supprimerait la nécessité de recouvrir de vernis les pointes qui pénètrent dans les tissus, précaution nécessaire pour éviter que l'action chimique qui peut être produite par le contact des liquides et des métaux ne soit l'origine d'une force électromotrice dont l'existence troublerait les résultats produits par la chaleur.

S'il s'agit seulement de faire pénétrer les éléments dans des cavités, il est préférable de ne point employer de soudure et de tortiller seulement ensemble les extrémités des fils métalliques : en dehors des contacts, ces fils sont recouverts de soie; on place les fils dans une enveloppe mince, formée par un tube de caoutchouc fermée à extrémité ou par une sonde en gomme élastique, de manière à soustraire les parties métalliques nues à l'action des liquides qui pourraient exister dans les points dont on veut comparer la température.

Le galvanomètre qui doit être à gros fil ne présente d'ailleurs rien de particulier : on peut observer les déviations directement, ou employer un miroir pour projeter une image lumineuse sur une échelle graduée. Les galvanomètres apériodiques sont naturellement d'un usage commode.

401. — L'emploi des piles ou aiguilles thermo-électriques comme thermomètres différentiels peut avoir pour but de reconnaître seulement l'existence et le sens d'une différence de température ; il n'y a rien de particulier à signaler dans ce cas. Il n'en est pas de même si l'on veut évaluer la différence de température; il existe deux mé-

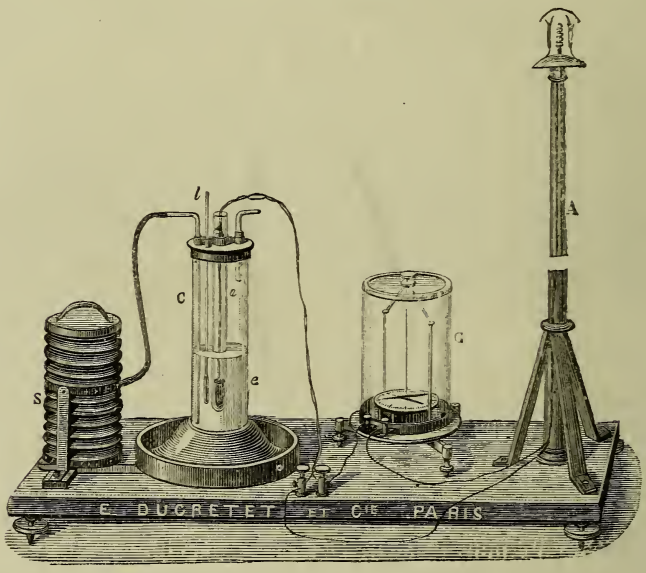


Fig. 270. — Thermomètre électrique de Becquerel (*Ducretet*).

thodes principales que l'on peut employer, suivant les circonstances.

Dans la première, on lit directement cette différence d'après la graduation du galvanomètre; elle permet d'appprécier des différences extrêmement minimes, mais elle exige que l'on ait établi à l'avance un tableau ou une courbe donnant la relation qui existe entre la déviation et la différence de température.

Dans la deuxième méthode, qui n'est d'ailleurs pas toujours applicable, on évalue la température de l'un des éléments en cherchant à ramener l'autre à la même température par conséquent en ramenant l'aiguille au zéro.

Cette dernière méthode est surtout d'un usage pratique lorsque l'on veut déterminer la température absolue et non plus seulement une différence de température : elle exige l'emploi d'un thermomètre et sa sensibilité ne peut dépasser celle de ce thermomètre même.

Les aiguilles thermo-électriques ont surtout été employées en physiologie : c'est ainsi qu'on a pu s'en servir pour comparer la température du sang artériel et celle du sang veineux; celle du sang avant et après son passage dans une glande, dans le foie, par exemple; celle qui existe entre deux muscles dont l'un travaille et l'autre ne travaille pas, etc. Si l'on a établi à l'avance une graduation on peut avoir la différence de température.

402. — Si l'on veut obtenir une température absolue, il suffit, avec une graduation préalable du galvanomètre, de maintenir l'une des aiguilles à une température connue et fixe, celle de la glace fondante, par exemple. Comme l'appareil ne peut, en général, indiquer que de faibles variations de température, il pourrait arriver que la température de la glace fondante fût trop éloignée de celle que l'on veut déterminer; pour les expériences médicales, pour les mesures de physiologie, on pourrait prendre, par exemple, la température d'ébullition de l'éther qui est de 36°,5 peu éloignée de celle des animaux supérieurs.

Pour que ces mesures soient réellement pratiques, il convient, le plus souvent, de renoncer au galvanomètre gradué, les valeurs indiquées lors de la construction de l'appareil pouvant varier avec divers éléments, notamment avec l'intensité du champ magnétique. La méthode de réduction au zéro est préférable : l'une des aiguilles étant au point dont on veut déterminer la température, on place l'autre dans de l'eau que l'on chauffe ou que l'on refroidit jusqu'à ce que le galvanomètre soit ramené au zéro : la température de l'eau mesurée aussi exactement que possible, mesurer la température à laquelle l'autre aiguille est portée.

On peut employer la disposition indiquée par Becquerel : l'un des éléments est placé au point (fig. 270) que l'on veut étudier, l'autre est introduit dans un tube plein de mercure plongé dans un liquide *e* où pénètre également un thermomètre *t*; on élève la température du liquide en le plaçant au-dessus d'un vase contenant de l'eau chaude, on l'abaisse en y insufflant de l'air à l'aide d'un soufflet S. Après quelques tâtonnements, on arrrive à ramener et à maintenir l'aiguille au zéro; il suffit alors de lire la température sur le thermomètre.

Cette disposition été appliquée déjà par M. Becquerel dans différents cas, notamment pour déterminer la température de points situés à une certaine distance au-dessous du sol ou à une certaine profondeur dans la terre.

403. Mesure des températures basée sur les variations de conductibilité.—La conductibilité des métaux varie avec la température suivant une loi assez compliquée; en général la résistance augmente avec la température [1] et peut être exprimée par la formule :

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2)$$

Pour le cuivre on peut, comme approximation, réduire cette formule au premier terme, au moins pour les températures ordinaires et prendre $a = 0{,}0038$.

Si donc on a un circuit traversé par un courant et que l'on vienne à changer la température d'une partie du circuit, il y aura une variation d'intensité de laquelle, en opérant convenablement, on pourra déduire le changement de température.

Bien qu'il soit possible d'opérer ainsi, en général, on cherche à évaluer directement la température en opérant par comparaison ou en compensant la variation de résistance. Telle est la disposition générale des appareils Siemens, la première méthode ayant été appliquée à la mesure des températures modérées, l'autre servant dans le pyromètre à la mesure des hautes températures.

Le thermomètre a été appliqué à la mesure de la température au fond de la mer. L'appareil consiste essentiellement en une hélice de cuivre K (fig. 271) placée dans une enveloppe isolante et reliée par ses deux extrémités à deux fils recouverts d'une matière isolante et d'une longueur variable suivant les cas. Il y a, d'autre part, une seconde hélice analogue H qui est placée dans un vase plongé dans l'eau. Ces appareils sont réunis par des fils, comme l'indique la figure avec une pile P, un galvanomètre G et des boîtes de résistance R et R'. On constitue ainsi un pont de Wheatstone. Au début, l'hélice K étant à la même température que H, on ramène à zéro l'aiguille du galvanomètre en faisant varier convenablement les résistances R et R'. On descend alors l'hélice K dans l'eau; l'aiguille du galvanomètre est déviée par suite de la variation de résistance de K. On détermine la température à un instant quelconque, en agissant sur le liquide qui entoure H, l'échauffant ou le refroi-

1. Il n'en est pas de même pour tous les corps et notamment pour les charbons qui servent dans les lampes électriques; la résistance diminue quand la température s'élève.

dissant suivant les cas, jusqu'à ramener à zéro l'aiguille du galvanomètre : quand cette condition sera réalisée, la température de H sera égale à la température cherchée de K.

On voit que dans cet appareil, les résistances R et R′ ne servent point à la mesure, elles permettent seulement d'établir au début les conditions qui ramènent au zéro l'aiguille du galvanomètre.

Dans le pyromètre pour laquelle les différences de température sont beaucoup plus grandes, on a un appareil différent et on opère autrement. On emploie alors une hélice de platine placée dans un manchon que l'on introduit dans le four : on peut faire usage d'un pont de Wheatstone, comme précédemment, et déterminer la température de l'hélice d'après les variations qu'il faut donner à l'une

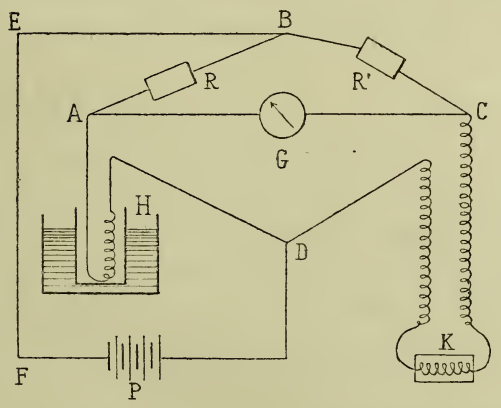


Fig. 271. — Principe du thermomètre électrique de Siemens.

des résistances auxiliaires pour ramener le galvanomètre au zéro. Mais on n'est pas assuré que le platine soumis à de grandes différences de température conserve une résistance invariable, de telle sorte que l'appareil ne fournit peut-être pas des indications bien précises.

404. — M. Sabine s'est proposé d'obtenir directement la température par la mesure des résistances sans avoir besoin, comme dans le thermomètre de Siemens, d'avoir un bain de comparaison, ou un thermomètre à mercure. L'appareil forme un pont de Wheatstone avec la pile et le galvanomètre comme d'ordinaire : les quatre branches (fig. 272) comprennent : deux, des résistances R, et R′ et les deux autres, deux hélices K et K′ de même longueur mais constituées par des métaux différents pour lesquels la variation de

résistance avec la température présente de grandes différences. Les deux hélices sont d'ailleurs disposées à côté l'une de l'autre, de manière à être portées ensemble à la même température. A chaque température le rapport des résistances de ces bobines K et K′ a une valeur déterminée et il faut donner à R et R′ des valeurs dans le même rapport pour ramener le galvanomètre au zéro. La connaissance de ce rapport de R à R′ permet donc de déterminer la température des hélices K et K′ si l'on a fait une série de mesures directes pour établir la graduation de l'appareil.

Dans la pratique, il est commode de faire varier le rapport des résistances R et R′ en faisant déplacer à l'aide d'un curseur l'extrémité du fil B sur un fil tendu; il suffira d'observer les positions de

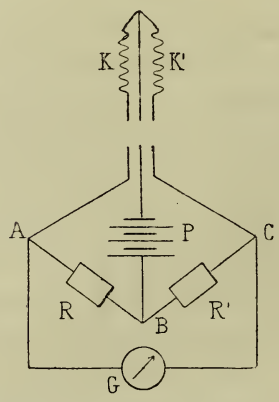


Fig. 272. — Principe du thermomètre électrique de Sabine.

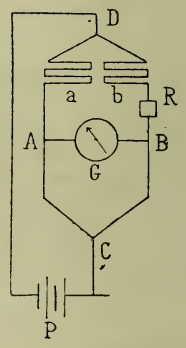


Fig. 273. — Principe du bolomètre du professeur Langley.

ce curseur pour connaître la température, si l'appareil a été préalablement gradué.

M. Sabine propose l'emploi du platine et d'un alliage de platine et d'argent pour les deux hélices K et K′; le premier métal éprouve un accroissement de résistance de 27 p. 100, l'alliage de 3,2 p. 100 seulement, quand la température varie de 0 à 100°.

405. Le bolomètre. — M. le professeur Langley a construit un appareil destiné à mesurer l'énergie radiante, qu'il a appelé le bolomètre et qui est également basé sur les variations de conductibilité des métaux sous l'influence des changements de température. La disposition générale (fig. 273) est toujours celle du pont de Wheatstone : elle rappelle, en principe, celle du thermomètre de M. Sabine, si ce n'est que les hélices sont de même nature et qu'elles

sont utiles seulement pour empêcher les actions ambiantes comme nous l'indiquerons.

On retrouve la pile P, le galvanomètre G : deux des branches du pont AC, BC sont invariables ; les deux autres contiennent les lames sensibles *a* et *b*, et l'une d'elles contient en plus une boîte de résistance R destinée à établir l'équilibre au début. L'appareil une fois réglé, l'aiguille du galvanomètre restera au zéro tant que les deux lames sensibles *a* et *b* seront à la même température ; les variations ambiantes ne peuvent avoir d'influence parce que, par construction, ces lames placées très près l'une de l'autre, subissent les mêmes actions. Mais il y aura une déviation de l'aiguille du galvanomètre si une des lames seule subit une action calorifique.

Les lames employées par M. Langley sont des lames d'acier, de platine ou de palladium ayant $0^{mm},5$ de largeur et $0^{mm},05$ d'épaisseur, on les place à côté les uns des autres de manière à occuper un es-

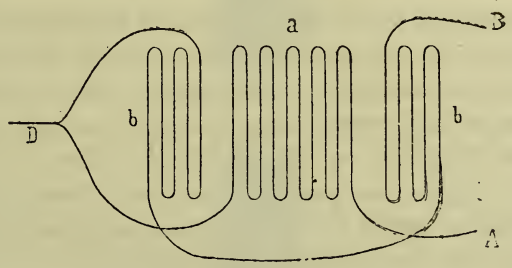


Fig. 274. — Détail du bolomètre.

pace très faible. Vingt bandes de $5^{mm},5$ de longueur occupent un espace de $0^{mm},025$ et forment une des branches du pont *a* (fig. 274), celle sur laquelle on fera tomber le faisceau que l'on étudie. L'autre branche est formée d'une manière analogue, mais les bandes sont réparties en deux groupes *b b*, situés de part et d'autre du groupe *a* par raison de symétrie.

Cet ensemble est placé dans un cylindre creux muni d'un diaphragme : les bandes *b* sont garanties contre l'action directe du faisceau par des écrans convenablement disposés tandis que par le déplacement du diaphragme le faisceau agira sur les bandes *a*. Tout échauffement général de l'air ou des supports sera évidemment sans action, car il agira également sur *a* et sur *b*, mais tout faisceau tombant sur *a* changera sa résistance et amènera la déviation de l'aiguille du galvanomètre.

Bien qu'on ne puisse employer un courant très énergique pour

éviter l'échauffement des lames sensibles, l'appareil fournit des indications nettes pour des actions très minimes et, à cause de la faible masse des lames sensibles, fonctionne avec une extrême rapidité. M. Langley admet que le bolomètre est susceptible d'indiquer des variations de température de 0°,00001.

406. Emploi de la chaleur dégagée par les courants. — L'échauffement que subissent les conducteurs traversés par un courant est un inconvénient en général; la chaleur ainsi produite et qui disparaît par le contact avec l'air, avec les supports ou avec les enveloppes des câbles représente une certaine quantité d'énergie qui, fournie par l'appareil producteur du courant, ne se retrouvera plus lorsque l'on appliquera ce courant à obtenir l'effet cherché. Mais il est certains cas dans lesquels cette élévation de température est précisément l'effet cherché; nous allons donner quelques exemples particuliers avant d'arriver à l'importante question de l'éclairage électrique.

Nous avons indiqué les lois qui régissent le dégagement de chaleur sous l'influence des courants, lois qui trouvent leur application dans toutes les circonstances où on emploie ceux-ci, mais qui sont particulièrement importantes pour les questions que nous avons à traiter. Avant d'aborder ce sujet et d'entrer dans le détail, il est nécessaire de signaler les particularités que présente la formation de l'*arc voltaïque;* après seulement, nous indiquerons les principales applications dans lesquelles la chaleur qui se dégage est directement utilisée comme source d'énergie sous la forme calorifique et celles plus importantes actuellement où la chaleur est utilisée par l'incandescence à laquelle elle amène certains corps dans des conditions déterminées.

407. De l'arc voltaïque. — Nous avons dit que le passage d'un courant dans un conducteur produit un dégagement de chaleur qui se manifeste par une élévation de température; cette élévation de température est limitée en général parce que, à partir d'un certain moment, les pertes par rayonnement sont égales au dégagement de chaleur produite par le courant, elle peut toutefois aller jusqu'à l'incandescence : le fil devient rouge et passe par toutes les colorations jusqu'au blanc; si le courant est assez intense, il peut même être fondu.

Les faits sont analogues d'ailleurs pour le passage d'une décharge : il y a échauffement, incandescence, fusion suivant les conditions de l'expérience, il peut même y avoir volatilisation du conducteur s'il est volatil.

Des phénomènes d'incandescence et de dégagement de chaleur se manifestent dans des circonstances différentes par la production de l'arc voltaïque.

Considérons deux conducteurs, deux cylindres de charbon taillés en pointe, par exemple, reliés par des fils aux pôles d'une pile ou aux bornes d'une machine et séparés par un certain intervalle, de telle sorte que le circuit n'étant pas fermé, le courant ne soit pas établi. Nous pouvons rapprocher beaucoup ces charbons sans qu'aucun effet se manifeste ; lorsque leur distance deviendra assez petite, une étincelle pourra jaillir si la différence de potentiel est grande : si par exemple celle-ci atteint 5000 volts, l'étincelle se produira pour une distance de 1 millimètre environ ; si elle est de 50 ou même de 100 volts on pourra amener les charbons au contact sans qu'il y ait étin-

Fig. 275. — Arc voltaïque.

celle. Mais, dans tous les cas, lorsque le contact aura été établi ; que par conséquent, le courant aura circulé, il sera possible d'écarter les charbons sans le faire cesser et l'on pourra produire ainsi un écartement bien supérieur à celui qui avait provoqué l'étincelle ; en même temps on observera entre les charbons un phénomène lumineux, l'arc voltaïque (fig. 275), qui a été décrit pour la première fois par Davy. Cet arc est à la fois très chaud et très lumineux, si le courant a une certaine intensité ; aussi est-il difficile de l'étudier directement ; mais on peut l'observer aisément soit en le regardant à travers un verre fortement coloré, soit en produisant sur un écran une image réelle à l'aide d'une lentille convergente et examinant cette image par diffusion. On reconnaît alors que les pointes de charbon sont amenées à une très vive incandescence correspondant à une température très élevée. Entre les deux pointes on observe une lueur con-

tinue allant de l'une à l'autre, souvent renflée vers sa partie moyenne ayant une coloration bleuâtre, sillonnée par instants de lignes lumineuses plus vives ; cet arc ne présente pas une fixité absolue, il subit quelques légers déplacements soit provoqués, soit spontanés et change de forme d'une manière presque continuelle.

On explique la formation de cet arc en admettant que des particules très fines, peut-être des vapeurs, sont entraînées par le courant et établissent une connexion entre les deux pointes, connexion qui complète le circuit qui, matériellement, paraît interrompu. C'est l'absence de particules solides dans l'arc qui, conformément aux explications généralement acceptées, fait que cet arc est relativement peu brillant malgré sa température élevée : les raies brillantes qui, comme nous l'avons dit, apparaissent de temps à autre, sont dues à des fragments détachés de l'une des pointes et se portant sur l'autre.

408. — L'idée que l'arc est constitué par un entraînement de la matière est justifiée en ce que si l'on opère avec des conducteurs métalliques (avec lesquels l'expérience réussit également) constitués de substances différentes, on peut retrouver après l'expérience, sur chacun d'eux, des traces de l'autre métal. Si l'on opère avec des charbons à l'abri de l'air, dans le vide (pour éviter les phénomènes de combustion dont nous parlerons tout à l'heure et qui compliquent l'action), on reconnaît également l'existence de ce transport : on voit en effet le charbon qui représente le pôle positif diminuer, tandis qu'il y a apport de matière sur le charbon négatif. On avait d'abord pensé qu'il y avait seulement entraînement de la matière dans ce que nous appelons le sens du courant ; mais les observations faites avec des conducteurs de nature différente ont montré qu'il y a transport dans les deux sens, le transport dans le sens du courant étant seulement plus énergique que le transport qui a lieu dans le sens opposé.

L'arc est quelque chose de matériel, car on peut le déformer en y projetant un courant d'air. Il est d'ailleurs traversé par le courant : outre que l'on ne comprendrait pas qu'il pût en être autrement, puisqu'il complète le circuit, on a vérifié par des expériences variées, en le soumettant à l'action d'aimants puissants ou à l'action de courants énergiques, qu'il se comporte absolument comme le ferait un circuit mobile occupant la même place et traversé par le courant.

On doit donc considérer l'arc voltaïque comme constitué par une chaîne de particules ou un nuage de vapeurs traversé par le courant ;

l'élévation de température qu'il présente est la conséquence de sa grande résistance conformément aux lois de Joule.

Il résulte de mesures prises par M. Rossetti que la température de l'arc serait de 4800°, celle du charbon positif de 4000° et celle du charbon négatif de 3000°.

409. — Ayant amené les deux charbons au contact de manière à établir le courant, mesurons, à l'aide d'un galvanomètre placé dans le circuit, l'intensité de ce courant. Éloignons alors les charbons de manière à donner naissance à l'arc : nous observerons immédiatement que l'intensité du courant diminuera. Cet effet peut s'expliquer par l'accroissement de la résistance provenant de l'introduction de l'arc dans le circuit; mais cette explication ne suffit pas et ne permet pas de rendre compte des effets observés et des mesures effectuées. Il faut admettre également que la production même de l'arc, absorbant de l'énergie, produit le même effet qu'une force électromotrice opposée à celle qui entretient le courant, qu'il se produit une *force contre-électromotrice*. Ce fait a été reconnu d'abord par Edlund à la suite d'études sur des arcs de diverses longueurs ; il a été vérifié ensuite par divers savants qui ont reconnu l'existence d'une variation brusque de potentiel entre les deux extrémités de l'arc ou entre les deux charbons, variation qui n'était pas en rapport avec la résistance propre de l'arc.

410. — Lorsque l'on produit l'arc voltaïque dans le vide il y a, par suite du transport du carbone, augmentation de longueur de l'arc : par suite, la résistance du circuit augmente, l'intensité du courant diminue et si cette intensité atteint une certaine valeur, l'arc s'éteint, le courant cesse de passer. Il ne suffirait pas alors, en général, de ramener la distance à ce qu'elle était auparavant et il faut de nouveau remettre les charbons au contact, puis les séparer.

Le même effet se produit à plus forte raison si les charbons ne sont pas placés dans le vide : ils brûlent au contact de l'air et l'usure se produit alors par les deux causes réunies : l'extinction de l'arc se produit alors comme précédemment, mais plus rapidement.

Il résulte de là que si l'on veut la éviter l'extinction de l'arc, il faut par un procédé quelconque maintenir invariable la distance des deux charbons. Nous dirons plus loin comment cette condition peut être remplie.

Il est important de remarquer que si, sans changer la distance des charbons, on vient à interrompre le courant pendant un temps déterminé même assez faible, l'arc ne se rétablit pas. Cependant il se reproduit si l'interruption a été excessivement courte, $0^s,05$

environ, l'arc se rétablira spontanément alors même que le courant aurait changé de sens, ce qui permet d'employer les machines à courants alternatifs pour produire l'arc voltaïque.

Le fait que le rétablissement de l'arc se produit même par l'action d'un courant de sens contraire au courant primitif permet de supposer que la condition de production de l'arc est la haute température et non l'état électrique des charbons qui aurait persisté; si l'interruption a duré plus longtemps le refroidissement qui se manifeste est suffisant pour faire disparaître les conditions qui correspondent à la production de l'arc voltaïque.

411. — Davy et les physiciens qui étudièrent la question après lui employaient comme conducteurs des baguettes de charbon de bois éteint dans le mercure ; l'usure de ces baguettes était rapide. Foucault, en 1846, remplaça le charbon de bois par du charbon de cornue, charbon qui se dépose sur les parois des cornues à gaz pendant la distilation de la houille. Ce charbon est bon conducteur et s'use assez lentement ; mais outre qu'il se travaille assez difficilement et que, par suite, les baguettes qu'il fournit sont d'un prix élevé, la consommation serait promptement devenue hors de proportion avec la production. Aussi ont-elles été complètement abandonnées et depuis un certain nombre d'années on ne fait plus usage que de baguettes de charbon artificiel ; ce charbon est obtenu en agglomérant des matières charbonneuses réduites en poudre à l'aide d'un liquide agglutinant, de sirop de sucre ou de gomme, par exemple, ou de goudron, puis faisant passer la pâte à la filière sous l'influence d'une forte pression et calcinant une ou plusieurs fois les baguettes obtenues, hors du contact de l'air et en présence de poussières charbonneuses ou de goudron.

412. — Lorsque l'on examine les charbons qui produisent un arc par le passage d'un courant continu on observe que d'une manière générale, ils présentent l'un et l'autre la forme conique ; mais, tandis que le charbon négatif est très nettement terminé en pointe, le charbon positif est un cône tronqué dont la base est excavée, présentant ainsi une disposition cratériforme ; la surface des cônes est rarement lisse, elle présente des globules qui disparaissent peu à peu, entraînés dans l'arc ; ces globules sont constitués par des matières étrangères en fusion ou au moins à l'état pâteux et c'est leur passage dans l'arc qui donne naissance aux lignes brillantes passagères que nous avons signalées.

On a constaté que l'usure du charbon positif est environ le double de celle du charbon négatif.

Bien entendu les différences que nous venons de signaler pour la forme et pour l'apparence des deux charbons disparaît si l'on emploie des courants alternatifs, chaque charbon se trouvant être successivement le charbon positif et le charbon négatif.

Dans le but de diminuer l'usure des charbons dans la partie qui est en dehors de l'arc mais qui n'en est pas moins fortement échauffée et qui brûle par conséquent au contact de l'air. M. Reynier a proposé d'employer des charbons dont la surface est recouverte de métal déposé électrolytiquement, cuivre ou nickel. Dans ce cas la partie qui brûle est restreinte, la forme conique est moins allongée, l'usure est moins rapide; la dépense de charbon est diminuée ; il y a, il est vrai, une légère coloration de la lumière, coloration qui paraît sans importance.

413. Applications directes des effets calorifiques produits par les courants. — Il n'est qu'un petit nombre de circonstances dans lesquelles on utilise directement la chaleur dégagée par les courants; on a proposé de s'en servir pour le chauffage des appartements et des wagons de chemins de fer. Mais, au moins jusqu'à nouvel ordre, ces procédés ne semblent point pratiques, surtout à cause de la dépense qu'ils occasionnent : sauf des circonstances bien exceptionnelles, l'énergie fournie par les courants est encore très coûteuse.

Aussi n'est-ce que dans quelques circonstances exceptionnelles qu'il y a avantage à employer des appareils où les courants produisent de la chaleur; c'est en général, dans le cas d'actions intermittentes, de peu de durée, ou pour satisfaire à des conditions très particulières.

Nous décrirons quelques applications avant d'aborder la question de l'éclairage électrique qui, bien qu'ayant des rapports directs avec les lois de Joule, constitue comme un chapitre à part qui présente un intérêt considérable et exige des développements assez étendus.

414. Creuset électrique de Siemens. — Les phénomènes calorifiques produits soit dans la continuité des conducteurs traversés par un courant intense, soit dans l'arc auquel ceux-ci donnent naissance ont reçu une importante application dans le creuset électrique de Siemens, que nous décrirons quoique nous ne croyons pas qu'il ait été réellement employé dans l'industrie.

L'appareil se compose d'un creuset ordinaire C (fig. 276) placé à l'intérieur d'une enveloppe métallique d'un plus grand diamètre; dans l'espace annulaire compris entre le creuset et l'enveloppe, on a

tassé une matière pulvérulente mauvaise conductrice de la chaleur et infusible, du charbon de bois pulvérisé par exemple. Le fond du creuset est percé d'une ouverture dans laquelle pénètre, en la remplissant exactement, une tige métallique, de platine ou de fer qui communique par un fil au pôle positif d'une puissante machine. Le couvercle A présente également une ouverture dans laquelle passe un charbon relié au pôle négatif de la même machine. Lorsque l'on a placé des fragments de métal dans le creuset et que l'on fait passer le courant, l'arc s'établit entre le charbon et le métal et le dégagement de chaleur amène progressivement la fusion du métal. Comme par suite de l'usure du charbon et de cette fusion même la longueur de l'arc se modifie constamment ainsi que l'intensité du courant, le charbon est mobile et son mouvement est déterminé par un régulateur S, analogue à ceux que nous décrivons plus loin.

Parmi les avantages de ce procédé, on doit citer en première ligne la faiblesse des pertes par rayonnement extérieur, l'enveloppe métallique s'échauffant très peu, et aussi le fait que l'atmosphère qui surmonte le métal en fusion n'est pas souillée par des gaz provenant de la combustion.

Un autre avantage, au point de vue économique, consiste en ce que l'appareil ne commence à fonctionner qu'à l'instant où il doit être utilisé et que toute dépense s'arrête au moment où l'opération est terminée.

415. — Allumoirs électriques. — L'incandescence produite dans un fil de platine par le passage d'un courant a été utilisée pour produire l'inflammation de corps combustibles d'une part, des substances détonantes d'autre part.

On a construit divers modèles d'allumoirs basés sur cette propriété : nous indiquerons, par exemple, l'allumoir Arnould qui se présente sous des formes diverses (fig. 277, 278, 279) où l'on a à considérer une poignée et un manche; dans la poignée se trouve une pile dont les pôles communiquent à deux conducteurs isolés passant dans le manche et réunis à leurs extrémités supérieures, qui sont à découvert, par une petite spirale de platine. Lorsque la pile fonctionne et que le circuit est fermé, le fil de platine arrive à l'incandescence et si on l'approche d'un brûleur à gaz dont le robinet est ouvert le gaz s'enflamme. Le platine revient à la température ordinaire soit si la pile cesse de fonctionner soit si le circuit n'est pas fermé.

On produit ou on interrompt le courant souvent à l'aide d'un contact à ressort que l'on peut pousser par l'intermédiaire d'un bou-

ton : le contact cesse quand le bouton est abandonné à lui-même, il s'établit et le courant passe quand on presse sur le bouton. On

Fig. 276. — Creuset électrique. (*La Lumière électrique.*)

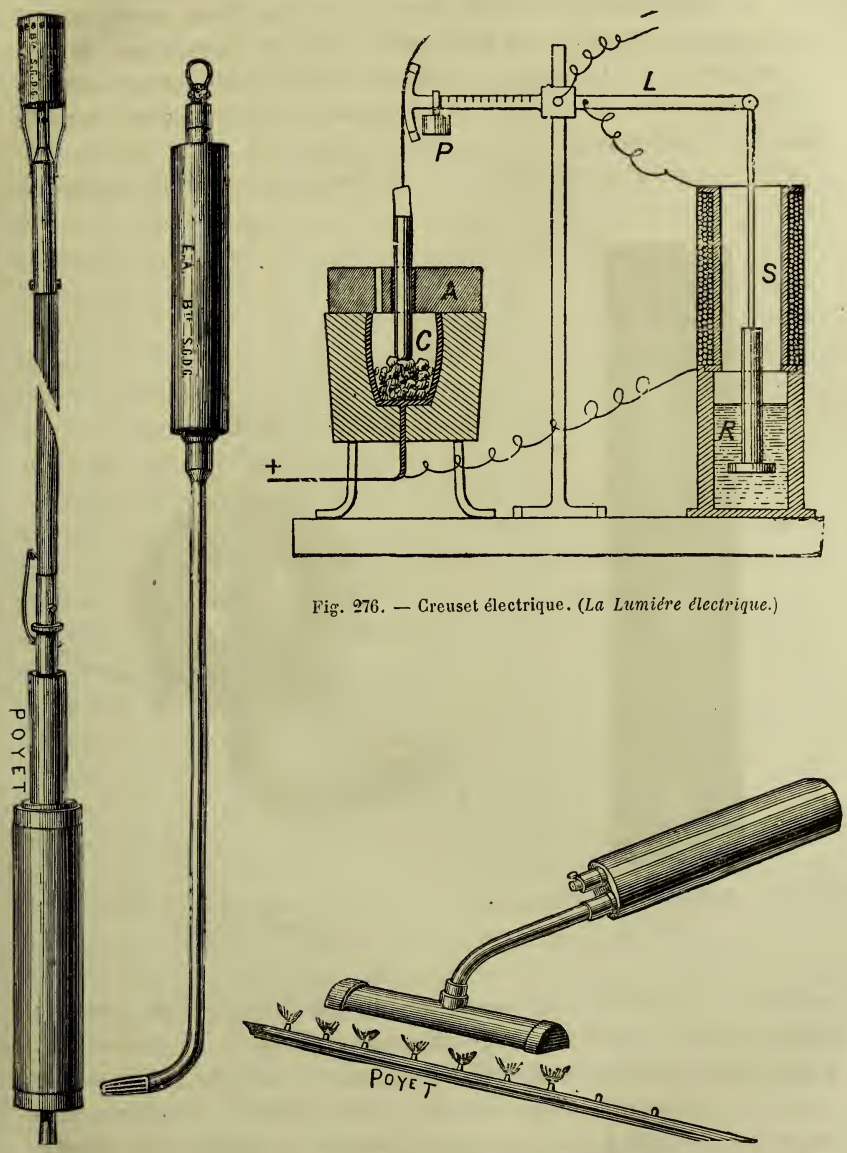


Fig. 277, 278, 279. — Modèles divers d'allumoirs Arnould.

peut aussi employer une pile à renversement qui n'agit que pour une position déterminée comme dans l'allumoir Arnould (fig. 280),

ou encore une pile au bichromate, par exemple, dont le zinc est maintenu hors du liquide par un ressort; le courant s'établit lorsque l'on abaisse une tige qui porte le zinc.

Il va sans dire que la pile peut n'être pas dans le manche et qu'elle peut être portée en bandoulière ou à la ceinture par la personne chargée de l'allumage; dans ce cas des conducteurs souples relient les pôles de la pile aux conducteurs qui passent dans le manche de l'allumoir.

416. — On a disposé aussi des appareils fixes adaptés à chaque

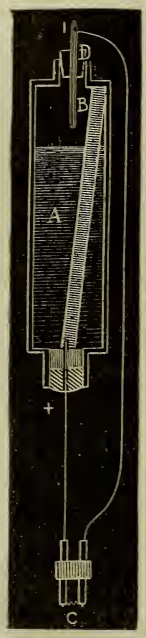


Fig. 280. — Pile de l'allumoir Arnould au repos.

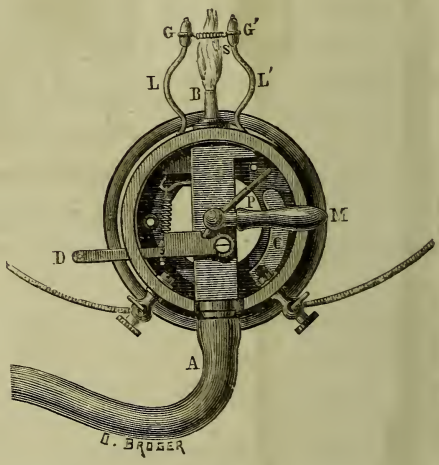


Fig. 281. — Allumoir de bec de gaz Leclanché. (*Barbier.*)

brûleur et produisant l'inflammation du gaz lorsque l'on ouvre le robinet; nous décrirons, par exemple, l'allumoir de Leclanché. B (fig. 281) est l'orifice par lequel s'écoule le gaz qui arrive par le tuyau A : l'allumoir comprend une pièce isolante circulaire surmontée d'une lyre LL′ qui porte une spirale de platine; le courant fourni par deux éléments Leclanché à agglomérés à trois plaques est amené à deux bornes; l'une d'elles est reliée métalliquement à la tige L; il n'en est pas de même de l'autre qui ne communique pas directement avec la tige L′ lorsque le robinet du gaz M est

ouvert ou fermé. Mais la manœuvre de ce robinet entraîne une pièce P qui établit le contact; si le mouvement n'est pas trop rapide, le courant amène à l'incandescence le fil de platine qui enflamme le gaz.

La spirale de platine doit être placée tangentiellement à la flamme autant que possible, afin d'éviter le dépôt charbonneux dans les spires, dépôt qui finirait par empêcher le fil de platine d'être amené au rouge.

Dans une autre disposition ingénieuse, le *fiat-lux*, le robinet du gaz peut être mû isolément; en outre le bec porte un système à bascule comprenant un fil de platine ordinairement éloigné de la flamme et ne communiquant pas avec la pile; mais lorsque, directement ou à l'aide d'un cordon, on vient agir sur la bascule, le mouvement que prend celle-ci fait tourner le robinet qui livre passage au gaz, amène le fil de platine au-dessus du bec et fait passer le courant dans le fil de platine qui, devenant incandescent, allume le gaz. Le système abandonné à lui-même revient à sa position primitive sans que le robinet cesse de rester ouvert.

Cet appareil est d'un emploi commode, il peut fonctionner avec les piles qui servent aux usages domestiques. Pour économiser un fil, on peut utiliser le tuyau de plomb comme fil de retour si la pile est un peu éloignée de l'allumoir.

Des appareils analogues et sur lesquels il n'est pas utile d'insister, d'autant qu'on peut faire varier le dispositif à volonté, ont été imaginés pour allumer des lampes à essence ou à pétrole; dans ce cas, en général la pile est jointe à l'appareil même. Tantôt, il faut presser la lampe contre un bouton pour fermer le circuit; tantôt la lampe est portée sur une pile à renversement (luciphore) qui n'entre en action que lorsqu'on la place horizontalement; tantôt, en pressant sur un bouton on abaisse le zinc dans le liquide ou on l'amène au contact d'une éponge d'amiante, ce qui constitue la pile et produit le courant. Toutes ces dispositions sont aisées à concevoir, ainsi que beaucoup d'autres; il ne semble pas d'ailleurs qu'elles soient entrées dans la pratique.

417. — On a imaginé d'ingénieux appareils basés sur l'emploi de l'électricité et résolvant le problème assez complexe que l'on peut énoncer ainsi :

Établir un système électrique tel qu'en fermant le circuit on allume une lampe placée à distance si elle est éteinte, ou qu'on l'éteigne si elle est allumée.

Il existe plusieurs solutions de ce problème; nous décrirons l'appareil de M. Ranque.

L'appareil (fig. 282) comprend une lampe placée sur un pied qui renferme le mécanisme et qui à l'aide de deux bornes peut être relié à une pile : deux éléments Leclanché suffisent. Le socle renferme un électro-aimant qui agit sur une bascule verticale qui porte la spirale de platine à sa partie supérieure et qui fait partie du circuit;

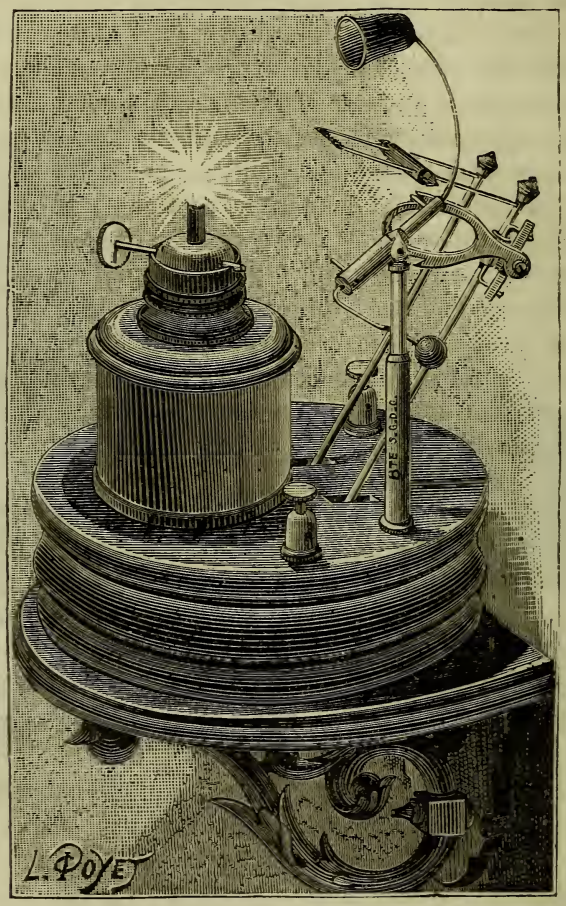


Fig. 282. — Allumoir extincteur du docteur P. Ranque.

lorsque le courant passe, la spirale rougit et la bascule mise en mouvement par l'action de l'électro-aimant la rapproche de la mèche. Mais au repos celle-ci est couverte par un éteignoir qui est porté par un autre système à bascule muni d'un contrepoids à l'extrémité inférieure. Quand cette bascule est horizontale, l'éteignoir

couvre la mèche; mais le système du fil de platine porte un cliquet qui s'avançant fait basculer l'éteignoir et découvre la flamme. Lorsque l'on cesse de presser sur le bouton, le courant ne passe plus, le fil de platine est ramené en arrière et revient à la température ordinaire. Si, pressant de nouveau sur le bouton on fait de nouveau passer le courant, le fil de platine sera bien ramené vers la flamme; mais un second cliquet rencontre le système de l'éteignoir, et le ramenant à l'horizontale éteint la flamme : le fil de platine bien qu'il soit incandescent ne peut produire aucune action. Le courant cessant, il revient à sa position primitive.

418. Amorces électriques pour mines. — L'inflammation de la poudre peut se produire sous l'influence d'un fil de platine porté à l'incandescence par le passage d'un courant : on se sert pour atteindre ce résultat d'amorces dites de *quantité;* elles diffèrent des

Fig. 283. — Amorce de quantité. (*La Lumière électrique.*)

amorces de tension, auxquelles d'ailleurs elles ressemblent à tous les autres points de vue, parce qu'il n'y a pas de discontinuité dans le conducteur qui les traverse; les fils par lesquels l'amorce est reliée au circuit sont bien interrompus vers le sommet de l'amorce, mais leurs extrémités sont reliés par un fil de platine fin *f* (fig. 283) qui, à cause de sa grande résistance, arrive à l'incandescence lorsqu'il est traversé par un courant. On donne généralement au fil la forme d'une hélice, parce que, à cause du rayonnement des spires les unes sur les autres, l'échauffement est plus intense pour un courant donné; en même temps cette hélice présente une certaine élasticité qui fait qu'elle peut être transportée sans se détériorer. Les extrémités de l'hélice sont soudées aux extrémités des conducteurs et toute cette partie est entourée de coton poudre qui s'enflamme à une assez basse température et communique l'inflamma-

tion aux autres matières combustibles que renferme l'amorce et sur la nature desquelles il est inutile d'insister.

Les amorces de quantité qui fonctionnent sous l'action de courants peu intenses n'exigent pas un isolement aussi parfait que les amorces de tension; de plus, par l'émission d'un courant faible, insuffisant pour amener l'incandescence du fil de platine fin on peut, à chaque instant, s'assurer si le circuit ne présente pas d'interruption, s'il est en état de fonctionner lorsque le moment sera arrivé. Mais par contre, à cause des inégalités dans la résistance des fils fins, ces amorces conviennent moins bien pour l'inflammation simultanée de plusieurs mines, la simultanéité n'est pas aussi complète, aussi absolue.

Le courant qui est envoyé dans les amorces de quantité est le plus souvent fourni par une pile dont la forme et la nature peuvent être quelconques à la condition que sa force électromotrice soit suffisante, cette force électromotrice devant être en rapport avec l'étendue du circuit. On emploiera naturellement les dispositions différentes suivant qu'il s'agira d'une pile qui devra pouvoir être transportée ou d'une pile qui sera à poste fixe; suivant aussi qu'il y aura à envoyer le courant dans une seule mine ou un seul circuit, ou qu'il sera nécessaire d'obtenir l'inflammation simultanée d'un grand nombre d'amorces. On peut donner comme exemple de ce cas l'explosion des mines de Hell Gate, à New-York où l'on enflamma simultanément 4200 cartouches. Ces cartouches étaient distribuées par groupes de vingt sur un même circuit et huit de ces circuits, dont on avait rendu les résistances égales étaient reliées à une batterie comprenant de quarante à quarante-cinq éléments; il y avait vingt-trois batteries semblables. Les fils conducteurs réunis en cable aboutissaient d'une part au pôle + des batteries, et d'autre part à des godets remplis de mercure et portés sur une planchette fixe; une planchette mobile située au-dessus de la précédente portait des pointes d'acier correspondant aux godets et reliées respectivement aux pôles — des batteries; en laissant tomber la planchette mobile, tous les contacts s'établirent à la fois et les quatre mille deux cents mines éclatèrent simultanément.

Dans les cas ordinaires, on peut employer une pile au bichromate dont les zincs et les charbons sont fixés à une planche (fig. 284) qui guidée par des tiges verticales et soutenue par des ressorts R les maintient hors du liquide. Pour les y plonger et provoquer le passage du courant, il suffit d'appuyer sur la poignée.

419. Lumière électrique. Systèmes différents d'éclairage élec-

TRIQUE. — L'arc voltaïque n'a pas été employé effectivement comme source de lumière avant Foucault qui l'utilisa pour l'éclairage d'un puissant appareil de projection analogue au microscope solaire, le microscope photo-électrique; dans cet appareil les charbons étaient mus directement par la main de l'opérateur qui réglait leur écartement de manière à obtenir un arc de grandeur et d'intensité constantes. Quelques années plus tard, Foucault construisait (1849) un régulateur automatique qui permettait d'obtenir les mêmes résultats sans l'intervention de l'opérateur; à la même époque, des appareils basés sur la même idée générale étaient imaginés en Angleterre par Staite notamment, ils ne paraissent pas avoir été employés d'une manière courante; divers autres modèles furent inventés ensuite qui résolvent convenablement la question d'une façon pratique.

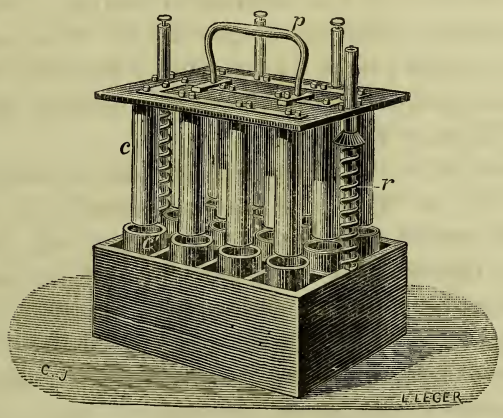


Fig. 284. — Pile pour l'inflammation des mines. (*La Lumière électrique.*)

Malgré ces perfectionnements, la lumière électrique ne recevait aucune application industrielle par suite des inconvénients que présentait la source de production du courant, la pile : l'emploi de la pile était coûteux, d'autant qu'il fallait de nombreux éléments, son montage et son entretien exigeaient des soins continuels. La construction de machines d'induction puissantes, robustes, fit entrer la question de l'éclairage électrique dans une nouvelle voie; quelques applications furent faites, mais l'emploi de ce procédé ne se généralisait pas cependant. Les régulateurs qui existaient alors étaient assez délicats et se prêtaient mal à une installation et à une exploitation industrielles.

L'invention des bougies Jablochkoff en supprimant le régulateur

fut un progrès très réel et fit avancer la question d'une manière très notable. Outre que ces bougies sont une source commode, pratique de lumière électrique et ont pu dès leur apparition être employées sur une grande échelle, c'est de ce moment que datent les progrès réels qui ont été faits dans la construction des machines d'induction dont l'étude faite complètement au point de vue pratique a permis de construire des modèles répondant à des besoins très variés. Il en est résulté que l'on peut dire que, indirectement l'invention de la bougie Jablochkoff a été une des causes de l'emploi qui a été fait à nouveau de régulateurs de lumière électrique.

Mais la lumière produite par l'arc voltaïque correspond toujours à une assez grande intensité lumineuse et ne répond pas par suite à tous les besoins. Pour les éclairages de faible et de moyenne intensités, on ne peut les utiliser : l'application d'un autre principe, celui de l'incandescence d'un conducteur continu, a donné la solution de ce problème. Bien que ce procédé ait été signalé à diverses reprises, il ne paraît pas qu'il ait conduit à des résultats utilisables dans la pratique jusqu'à l'année 1880 où la solution industrielle fut trouvée par Edison et par Swan.

On peut dire que, actuellement, les appareils de lumière électrique sont susceptibles de répondre à tous les besoins; si ce mode d'éclairage n'est pas encore d'un usage plus fréquent cela tient à ce que son prix est relativement élevé pour de petites installations si celles-ci doivent produire les courants électriques. Aussi l'application ne deviendra générale que lorsque sera résolue la question de la production d'électricité à bon marché soit par l'établissement de systèmes étendus de distribution d'électricité, soit par la découverte d'une nouvelle source de courants électriques à bas prix.

420. Lampes électriques a incandescence. — Bien que chronologiquement, les lampes à incandescence ne soient entrées dans la pratique que longtemps après les lampes à arc, nous les étudierons d'abord, parce qu'elles présentent une plus grande simplicité.

On peut utiliser l'incandescence du platine pour produire l'éclairement, on l'a fait dans quelques circonstances spéciales : mais l'emploi du charbon est bien plus avantageux à tous égards : le charbon est infusible, tandis que le platine fond assez aisément s'il est réduit en fil mince; il possède une plus grande résistance au passage de l'électricité et, par suite, pour une même intensité de courants et à dimensions égales, il produit une plus grande quantité de chaleur; sa chaleur spécifique est moindre que celle du platine, une même quantité de chaleur l'élèvera donc à une plus haute tem-

pérature; enfin, à température égale, le charbon présente un pouvoir rayonnant supérieur à celui du platine.

Mais le charbon porté à l'incandescence dans l'air brûle assez rapidement; pour qu'il ne disparaisse pas presque immédiatement, il faut employer des baguettes ayant un certain diamètre; il faut de plus ne faire passer le courant que sur une longueur restreinte de cette baguette, dans le voisinage de l'extrémité et employer un système qui fasse avancer la baguette au fur et à mesure de son usure : la baguette doit s'appuyer par son extrémité sur un morceau de charbon d'assez grandes dimensions pour ne pas être porté à l'incandescence par le passage du courant, pour ne pas s'user par conséquent, du moins d'une manière sensible. Nous n'insisterons pas sur cette disposition générale que l'on retrouve notamment dans les lampes Reynier et dans les lampes Werdermann, ces systèmes paraissant abandonnés en France.

Une autre solution se présente : elle consiste à employer des filaments de charbon de petit diamètre et, pour éviter qu'ils ne s'usent par la combustion, à les placer dans une atmosphère inerte, mieux encore dans le vide. C'est à cette disposition qu'appartiennent les lampes à incandescence employées aujourd'hui : systèmes Edison, Swan, Lane-Fox, Maxim et autres.

Pour qu'un filament de charbon puisse donner des résultats avantageux, il faut qu'il présente une grande homogénéité de constitution; il faut que sa partie médiane soit de moindre section que les extrémités par lesquelles il est en connexion avec les conducteurs du courant, afin que l'échauffement porte principalement sur cette partie médiane et non sur les extrémités qui se détérioreraient trop rapidement. La forme du filament n'est pas indifférente, il faut qu'elle ne soit pas rectiligne pour présenter une certaine élasticité et se prêter sans rompre aux variations de longueur; il faut donc qu'il présente des parties courbes ou qu'il affecte une forme angulaire. A un point de vue différent, à celui de l'effet de l'éclairage, il est bon que la partie incandescente embrasse un certain espace, qu'elle ne soit pas réduite à un point ou à un trait lumineux trop mince.

Ces diverses conditions ont été réalisées différemment dans les systèmes proposés que nous allons passer rapidement en revue.

421. — Une lampe à incandescence est composée essentiellement d'un filament de matière charbonneuse placé dans une ampoule dans laquelle on a fait le vide ou dans laquelle on a introduit un gaz inerte (fig. 285); les divers systèmes diffèrent les uns des autres surtout par la nature du filament, son mode de préparation et sa

forme; un point secondaire mais qui n'est pas sans importance consiste dans le mode de jonction des extrémités de ce filament avec les conducteurs qui le mettent en rapport avec la source d'électricité. Quant aux autres particularités, forme de l'ampoule, mode de jonction de l'ampoule avec son support, ce sont des éléments que chaque constructeur peut varier à son gré et qui ne présentent aucun intérêt au point de vue de l'électricité. Nous décrirons avec quelques détails le modèle Edison et nous donnerons seulement de rapides indications sur les autres systèmes.

Les filaments de charbon proviennent de la carbonisation de

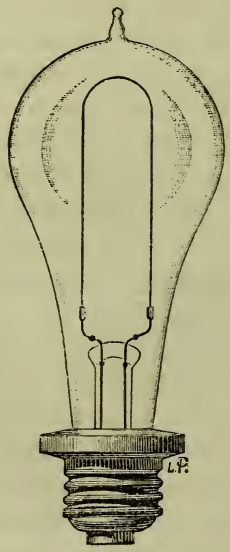


Fig. 235. — Lampe à incandescence, système Edison.

fragments de certaines espèces de bambou du Japon, fragments pris à la partie superficielle de la tige; cette substance a été choisie par Edison à la suite de nombreux essais sur les matières les plus diverses; il est probable que l'une des conditions des bons effets observés provient de la continuité des fibres parallèles qui constituent ces fragments. Le bambou importé en lames de $0^m,20$ de longueur environ est d'abord amené à l'épaisseur qu'il doit conserver, puis à l'aide d'un outil spécial, on le découpe en minces rubans présentant à leurs extrémités deux renflements qui serviront à fixer le charbon : chaque ruban ainsi obtenu est parfaitement jaugé dans toutes ses parties. Il est alors placé dans un moule plat en nickel

qui lui donne la forme recourbée qu'il doit conserver; le moule est fermé et on le place avec un certain nombre d'autres dans une caisse réfractaire que l'on remplit de plombagine et que l'on porte dans un four où on la chauffe pendant un temps assez long pour que la carbonisation ait atteint le degré convenable : le charbon est alors prêt.

422. — D'autre part, on a préparé la pièce à laquelle doit être fixé le charbon : elle consiste en un tube de verre présentant un renflement dans le voisinage de son extrémité qui est fermée; la base de ce tube est traversée par deux petits fils de platine qui sont reliés dans l'intérieur du tube à deux fils de cuivre qui seront les conducteurs du courant; en dehors du tube ils sont reliés également à deux autres fils de cuivre de moindre largeur dont les extrémités libres sont aplaties : l'emploi du platine est nécessaire parce que son coefficient de dilatation est le même que celui du verre, le cuivre ne pourrait le remplacer; la soudure du verre au métal ne résisterait pas aux changements de température. Le charbon est alors mis en place, ses extrémités se trouvant serrées dans les parties évasées des fils de cuivre que l'on recourbe avec des pinces : cette pièce complexe est alors portée dans un bain de sulfate de cuivre où, par les procédés ordinaires de l'électrolyse, on dépose du cuivre sur les attaches du charbon et les parties voisines, de manière à établir une continuité parfaite.

D'autre part encore, on a préparé les ampoules : ce sont des poires de verre présentant d'une part une ouverture assez large et évasée, à l'autre extrémité une portion de tube cylindrique. On introduit le charbon dans l'ampoule par la partie évasée qui va s'appliquer sur le renflement précédemment indiqué et on soude ces parties au chalumeau. On procède alors à l'extraction de l'air : pour cela l'ampoule est mise en communication par son tube de verre avec une pompe à mercure de Sprengel qui fonctionne constamment. Lorsque l'opération est près de sa fin on commence à faire passer un courant dans le charbon en le mettant en communication par les fils de cuivre extérieurs avec une source d'électricité; par l'emploi de résistances graduées, on fait passer des courants croissants jusqu'à ce que le charbon ait atteint l'éclat qu'il devra posséder lorsque la lampe fonctionnera; cette opération a pour effet, entre autres, de faire dégager les gaz qui étaient condensés à la surface du charbon ou peut-être même dans sa masse et qui, se dégageant lorsque la lampe serait terminée, nuiraient à son fonctionnement.

Lorsqu'il ne se dégage plus de gaz, ce que l'on reconnaît par

l'apparence du mercure dans la pompe, la lampe est terminée; on ferme au chalumeau le tube qui la reliait à la pompe et on enlève la lampe.

Celle-ci est alors introduite par son pied dans un cylindre de cuivre présentant extérieurement un filet de vis et à l'intérieur duquel on coule du plâtre qui maintient l'ampoule : les fils de cuivre, maintenus séparés aboutissent en deux points différents à des pièces métalliques par lesquelles s'établira le contact avec les conducteurs du courant.

Dans cette rapide description du mode de construction des lampes Edison qui permet aisément de comprendre leurs principales dispositions, nous ne nous sommes pas arrêté, nous n'avions pas à le faire, aux précautions à prendre pour le travail du verre; non plus qu'à la description de la pompe de Sprengel. Disons cependant que l'on n'opère pas sur une seule ampoule à la fois, mais sur plusieurs centaines, grâce à l'emploi de batteries de pompes, pour ainsi dire, à la partie supérieure desquelles le mercure arrive par une conduite commune et qui le laissent écouler dans un même réservoir d'où un appareil élévatoire le remonte constamment au niveau supérieur; il y a là de fort ingénieuses dispositions sur lesquelles il est inutile d'insister.

423. — Les autres lampes à incandescence présentent, d'une manière générale, la même disposition et sont construites par des procédés analogues; indiquons les principaux caractères qui les distinguent.

La lampe Swan a été inventée à la même époque que la lampe Edison, à quelques jours près; le charbon est constitué par une tresse de coton carbonisé, il présente une boucle à sa partie recourbée, ce qui augmente l'étendue circonscrite par le fil lumineux. On retrouve également la tresse de coton carbonisée dans les lampes Siemens et Halske.

Dans les lampes Lane-Fox le charbon, qui présente la forme simple du charbon d'Edison, est constitué par des brins de chiendent carbonisé; les extrémités du charbon s'engagent dans de petits cylindres creux de plombagine où pénètrent par l'autre extrémité les fils de platine.

Le charbon de la lampe Maxim a la forme générale de la lettre M, sa largeur est plus grande que dans les systèmes précédents : il est obtenu en découpant suivant cette forme dans du carton spécial que l'on carbonise incomplètement avant de l'introduire dans la lampe. On remplit celle-ci de vapeur de carbure d'hydrogène et on

fait passer le courant; la carbonisation du carton se complète, d'une part. D'autre part, le carbure d'hydrogène se décompose et du carbone vient se déposer sur le filament porté à l'incandescence et augmente sa solidité. La lampe est fermée pleine de ce carbure d'hydrogène, de telle sorte que la consolidation du charbon peut se continuer pendant l'usage courant.

La largeur du filament augmente naturellement le pouvoir éclairant, mais conduit à l'emploi de courants plus puissants que pour les lampes précédentes.

M. Anatole Gérard emploie des filaments obtenus en faisant passer dans une fine filière une pâte charbonneuse préparée avec un soin spécial et que l'on calcine ensuite à l'abri de l'air; deux charbons de ce genre sont réunis angulairement, en forme de V renversé Λ et soudés à leur partie supérieure par une goutte de la pâte charbonneuse (fig. 286).

Dans la lampe Muthel, on trouve un tout autre système : le filament est constitué par une pâte formée par un mélange de magnésie, de silicate de magnésie, de kaolin, que l'on chauffe à l'incandescence après lui avoir donné la forme convenable, puis que l'on rend conductrice en y incorporant des sels métalliques divers que l'on réduit par une nouvelle calcination : cette lampe n'est guère employée, au moins en France.

424. — La température produite par un courant d'intensité donnée dépend de la section du filament de charbon, mais l'éclairement obtenu dépend en outre de l'étendue de la surface : de là l'idée d'employer des cylindres creux au lieu de cylindres pleins. Les lampes basées sur ce principe sont de deux modèles principaux :

La lampe de Bernstein, connue aussi sous le nom de lampe de Boston dans laquelle le cylindre de charbon est obtenu par la carbonisation de rubans cylindriques de soie (cylindres creux).

La lampe Cruto dans laquelle le charbon est fait sur place d'une manière ingénieuse. On construit une lampe, très analogue à la lampe Edison dans laquelle le charbon de bambou est remplacé par un fil de platine très fin; on remplit l'ampoule de gaz d'éclairage et l'on fait passer dans le fil un courant qui l'amène à l'incandescence; l'hydrogène carboné est décomposé et le carbone se dépose peu à peu sur le platine qu'il recouvre; on augmente progressivement l'intensité du courant, ce qui fait croître le dépôt de charbon. On s'arrête lorsque pour un courant déterminé l'éclat a une valeur fixée à l'avance, ce qui entraîne une résistance également déter-

minée. On fait alors passer pendant un temps très court un courant

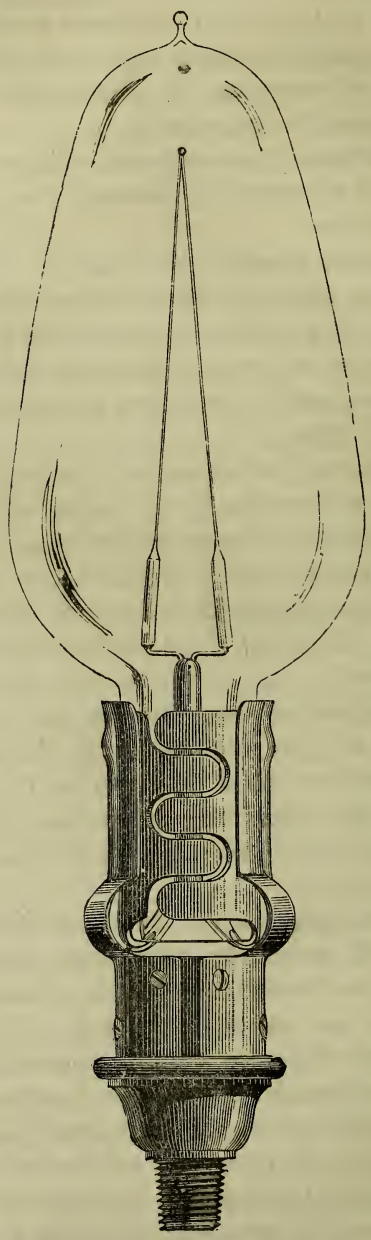


Fig. 286. — Lampe à incandescence de A. Gérard.

puissant qui volatilise le platine : il reste donc un cylindre creux de

charbon. Il semble que le charbon ainsi obtenu présente une grande homogénéité; il fournit en somme des résultats satisfaisants.

425. — Il existe des lampes à incandescence d'intensités très diverses; on obtient ces différences d'intensité en donnant au charbon des résistances différentes et en proportionnant convenablement l'intensité du courant. Il importe de remarquer que la résistance du filament qui peut suivant les cas être de 50, 100, 200 et même 250 ohms doit être mesurée à la température même où la lampe doit être utilisée et non à la température ordinaire où la résistance serait beaucoup plus grande.

Il n'y a pas une précision absolue dans les indications relatives aux intensités lumineuses; les constructeurs les estiment en *candles* ou en *bougies* qui n'ont pas une valeur bien déterminée : on peut admettre cependant que le carcel étalon vaut à peu près 9 candles ou 7,5 bougies allemandes.

Les types de lampes à incandescence qui sont le plus fréquemment usités sont ceux de 8 et de 16 bougies; on en a construit de moindres d'ailleurs, de 4 bougies (Edison), et M. Trouvé en a employé de très petites et de l'intensité de 1 ou 2 bougies pour ses bijoux électriques et pour son polyscope.

Bien que les types de 8 et de 16 bougies conviennent dans le plus grand nombre de cas pour l'éclairage des intérieurs, on peut en employer de plus puissants par exemple celui de 25 bougies (A. Gérard, Müller, Siemens) celui de 32 bougies (Edison) ; on a même été plus loin et on a construit des lampes pouvant rivaliser avec les bougies Jablochkoff et atteignant 100, 200 et même 300 bougies.

Ces lampes puissantes permettront d'étendre le champ de l'emploi des appareils à incandescence que l'on a considérées d'abord comme répondant à des besoins restreints auxquels d'ailleurs ils conviennent parfaitement. Comme il arrive souvent, il résulte de chiffres fournis par les constructeurs ou résultant d'essais faits dans des circonstances diverses que la lumière est d'un prix d'autant moins élevé que l'intensité de chaque lampe est plus considérable. C'est ainsi que pour les petits modèles la dépense d'énergie est d'environ 5 volt-ampères par bougie et qu'elle s'abaisse progressivement jusqu'à n'être plus que 2,5 et même moins, 1,5 volt-ampère pour des lampes de 200 bougies; bien que ce résultat soit fort acceptable, il convient de faire des réserves tenant à l'incertitude des mesures photométriques.

La différence de potentiel qu'il faut maintenir aux deux extrémités des conducteurs de la lampe n'a rien de fixe; en général elle se

rapproche de l'une des valeurs suivantes : 100 volts ou 50 volts, cependant dans quelques modèles, elle est moindre, descendant à 30, 25 et même 18 volts (A. Gérard); naturellement l'intensité du courant varie en sens inverse, elle est généralement comprise entre 0,3 et 2,5 ampères; cependant quelquefois elle dépasse cette valeur atteignant 5, 7 et même 8 ampères (Bernstein).

Un élément important qui intervient dans la détermination du prix de l'éclairage par l'incandescence, c'est la durée des lampes; cet élément est d'autant plus important que, actuellement encore, les lampes coûtent cher, le prix s'abaissera par la suite, certainement, au fur et à mesure que les brevets s'éteindront : la différence sera même considérable.

On ne sait rien d'absolument précis sur la durée de l'existence des lampes à incandescence, cette durée dépend d'ailleurs de la manière dont on les emploie et l'expérience a montré qu'elle diminuait rapidement lorsque l'on augmente même faiblement au delà de la valeur normale l'intensité du courant qui les traverse.

Pour des lampes des types les plus usités de 8 et 16 bougies, on peut admettre que, en moyenne la durée d'une lampe varie entre 700 et 1000 heures. On en a vu qui résistaient pendant un temps beaucoup plus long, mais c'est l'exception[1].

C'est par la destruction du filament qui se rompt en un point que se produit l'extinction des lampes à incandescence; nous signalons seulement le cas où il y aurait, à la suite d'un choc, rupture de l'ampoule, naturellement alors le charbon incandescent se trouvant au contact de l'air disparaîtrait en un instant en se consumant.

427. — Quel que soit le système employé, on fixe la lampe à incandescence à un support de forme quelconque à l'aide du pas de vis qui y est adapté; le support donne passage aux fils qui relient la lampe aux conducteurs chargés de lui fournir le courant. Ce support présente un commutateur que l'on tourne comme un robinet et qui, à volonté, fait passer ou interrompt le courant. Dans certains cas même, ce commutateur avant de rompre le circuit introduit des résistances croissantes qui affaiblissent le courant; on peut diminuer progressivement l'éclat de la lumière jusqu'à celle d'une veilleuse en passant par tous les éclats intermédiaires. En un mot, l'usage de ces lampes est aussi simple que celui des lampes à gaz.

Lorsqu'une lampe fait partie d'un circuit complexe de distribu-

1. On trouvera des renseignements numériques très détaillés sur les lampes à incandescence dans un rapport publié par le *Franklin Institute* (1885) et reproduit par la *Lumière électrique*.

tion d'électricité, il peut arriver que, par suite d'une augmentation notable de l'intensité, le charbon soit détruit, ce qui amène une extinction. Pour éviter cet accident on interpose sur le trajet du courant une petite longueur de fil de plomb dont la section a été calculée pour que si le courant prend une intensité supérieure à celle qui correspond à la marche normale, l'échauffement de ce fil soit suffisant pour fondre le plomb. Si donc le courant augmente d'intensité au delà des limites fixées, la fusion se produisant, la lampe se trouve mise hors circuit; elle s'éteint parce que le courant ne la traverse pas, mais elle n'a subi aucune détérioration.

428. — Les avantages des lampes à incandescence sont évidents et indiquent les circonstances dans lesquelles il y a un intérêt réel à les employer.

La lumière fournie par les lampes à incandescence a une teinte variable suivant la température à laquelle on élève le filament de charbon; le plus souvent elle est un peu jaunâtre, se rapprochant par là de la lumière du gaz, quelquefois elle est plus blanche. Elle est très fixe si la source d'électricité fonctionne régulièrement; cette source est le plus souvent une machine d'induction à courants alternatifs ou continus; si elle n'est pas en rapport avec le travail qu'elle a à fournir, si la marche n'est pas régulière, on peut observer des variations d'intensité de la lumière, variations périodiques. Mais ce ne sont pas là des défauts inhérents aux lampes à incandescence et on peut les éviter en installant convenablement le système générateur d'électricité.

La constitution de la lumière des lampes à incandescence diffère peu de celle du gaz; pas plus que celle-ci, elle ne saurait présenter d'inconvénients au point de vue de l'hygiène de la vue; les lampes à incandescence peuvent être employées comme les becs de gaz, dans les mêmes conditions.

Pendant son fonctionnement, la lampe à incandescence n'apporte aucune modification à l'atmosphère : elle n'en absorbe pas l'oxygène et n'y verse ni acide carbonique, ni vapeur d'eau. A cet égard elle est bien supérieure à tous les autres systèmes d'éclairage par lesquels l'atmosphère est toujours vicié malgré la ventilation, généralement imparfaite d'ailleurs. De plus la quantité de chaleur que répandent les lampes à incandescence, sans être nulle, est absolument négligeable dans la pratique, ce qui lui assure la supériorité sur les autres procédés d'éclairage.

Pour ces diverses raisons, il n'est pas douteux que le système d'éclairage par incandescence est le meilleur que l'on puisse adopter

pour l'éclairage des intérieurs alors surtout que l'étendue à éclairer n'est pas assez grande pour admettre l'emploi des sources très puissantes comme les lampes à arc. Ajoutons même que, dans les grandes salles, l'effet est toujours bien plus agréable si l'on obtient le même éclairement total par un grand nombre de lampes d'un éclat moyen plutôt que par un petit nombre de foyers très intenses. Aussi la question de généralisation de ce système d'éclairage n'est-elle qu'une question de prix ; il s'imposera lorsque son prix sera assez réduit pour que non seulement il coûte moins cher que l'éclairage au gaz, mais que l'on puisse regagner le prix des installations de gaz qu'il faudra abandonner.

Les qualités très grandes que nous venons d'indiquer n'ont pas

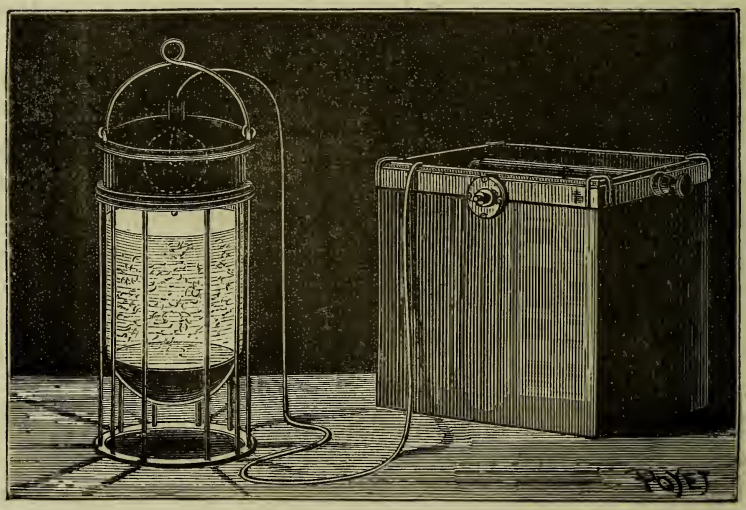


Fig. 287. — Lampes à incandescence appliquée à l'étude des fermentations. (*G. Trouvé.*)

d'intérêt au point de vue de l'éclairage en plein air ; aussi, sauf pour l'économie, si elle existe ou doit exister, sauf peut-être aussi parce que la lumière à incandescence se rapprochant de celle du gaz à laquelle nous sommes habitués nous paraît plus agréable, nous ne croyons pas que ces lampes à incandescence soient appelées à remplacer pour l'éclairage des rues, places ou jardins, les lampes à arc et les bougies électriques.

429. Applications spéciales des lampes a incandescence. — Mais, d'autre part, le minime échauffement que dégagent les lampes à incandescence les rend propres à quelques usages spéciaux. C'est

ainsi que M. Trouvé a remplacé dans son polyscope le fil de platine par une très petite lampe à incandescence; c'est ainsi encore qu'il a utilisé ces lampes à produire l'éclairement de vases remplis d'eau et destinés à l'étude des animaux marins et à celle des liquides qui sont le siège de fermentation (fig. 287); ces vases sont cylindriques, ils sont surmontés d'un couvercle parabolique argenté au foyer duquel est la lampe; ce couvercle fait réflecteur et envoie dans l'eau un faisceau parallèle; le fond du vase est formé par une glace argentée de manière qu'il réfléchit le faisceau, les objets situés dans l'eau sont donc éclairés dans toutes les directions.

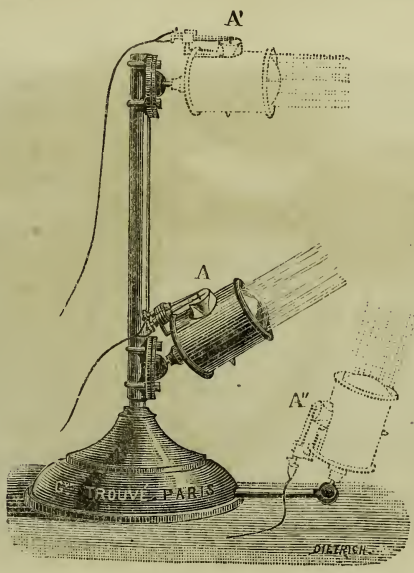


Fig. 288. — Photophore monté sur un pied (*G. Trouvé.*)

L'absence de dégagement de chaleur explique que l'on ait appliqué avantageusement les lampes à incandescence à l'éclairage des microscopes : dans le cas d'objets transparents, par exemple, on peut mettre directement la lampe, source de lumière, sous le porte-objets en supprimant le miroir réflecteur; diverses dispositions ont été adoptées (fig. 288), elles sont aisées à comprendre, il n'y a pas lieu d'insister.

Les petites lampes n'exigeant qu'une faible dépense d'énergie peuvent entrer en action sous l'influence de piles d'un poids minime et d'un petit volume. M. Trouvé les a employées pour produire un

effet décoratif en plaçant ces lampes dans des bijoux divers, dans des fleurs artificielles. La pile employée est une pile au bichromate présentant une fermeture hermétique, elle est reliée à la lampe par des cordons simples contenant les fils conducteurs; ces bijoux ont été utilisés dans plusieurs ballets.

Plus utilement les lampes ont servi d'une manière analogue dans la construction du photophore (fig. 289) dû à MM. P. Hélot et Trouvé : la lampe est placée dans cylindre métallique présentant à une base un réflecteur concave et à l'autre une lentille de manière à donner à la sortie un faisceau d'une assez grande intensité; le cylindre est monté sur une sangle élastique que l'on peut adapter autour de la

Fig. 289. — Photophore de MM. P. Hélot et G. Trouvé.

tête, on peut le diriger de manière que le faisceau éclaire précisément les points vers lesquels on tourne la tête pour les voir; cet appareil a été utilisé en chirurgie dans diverses circonstances, par exemple pour la laryngoscopie. Dans le cas où l'observateur doit se déplacer il emporte la pile dans une gibecière fixée à la ceinture.

430. — L'avantage que présentent les lampes à incandescence de donner de la lumière sans présenter aucun point incandescent au contact de l'air les rend précieuses pour les cas où il s'agit de pénétrer dans des espaces où se trouvent des mélanges inflammables ou détonants. C'est par exemple le cas des mines où il se produit un dégagement de grisou : jusqu'à présent cependant on n'est pas arrivé à employer pratiquement d'une manière un peu

générale les lampes pour l'éclairage des galeries de mines. On hésite à établir des lampes fixes qui éclaireraient mal les fronts de taille faute de pouvoir les déplacer absolument à volonté et il semble difficile de faire porter les piles par les mineurs à cause des positions très variées qu'ils sont obligés de prendre; nous pensons cependant que l'usage des lampes à incandescence se généralisera dans ce cas.

Il en sera de même, croyons-nous aussi, toutes les fois qu'il s'agira de pénétrer dans une atmosphère contenant du gaz d'éclairage, des vapeurs combustibles, de manière à éviter des explosions; en particulier, les pompiers appelés à exécuter des sauvetages ou à

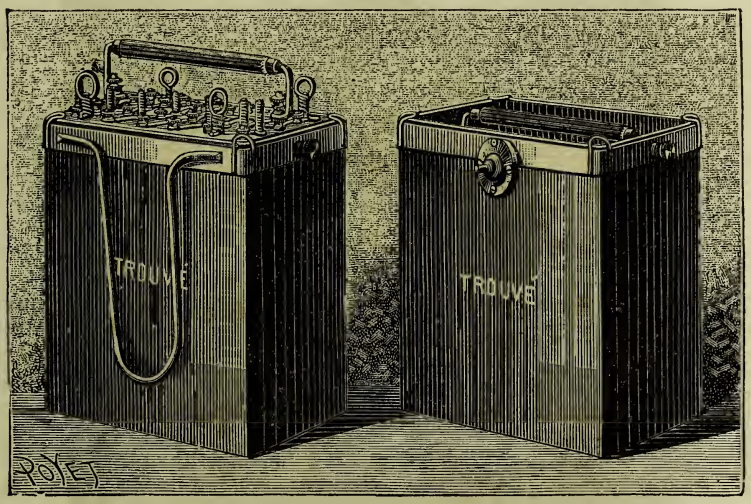


Fig. 290. — Pile électrique transportable Trouvé pour production de la lumière électrique.

travailler dans des atmosphères de cette nature devraient toujours en être munis et l'on ne saurait s'étonner assez de l'indifférence, à ce point de vue, pour ne pas dire plus, des personnes qui sont chargées d'assurer ce service. Pour éviter la complication de deux pièces distinctes, la pile et la lampe, et des fils de communication, des modèles ont été imaginés qui réunissent le tout sous des dimenmensions qui ne dépassent guère celles des lanternes ordinaires. Pour que l'appareil soit d'un emploi plus facile, la pile est toujours prête à fonctionner, contenant le liquide excitateur; mais c'est au moment seulement d'en faire usage que le contact s'établit entre le liquide et les électrodes zinc et charbon. Dans un modèle combiné

par M. Trouvé (fig. 291), les électrodes fixées par une extrémité à une tablette en ébonite soit suspendue au dessus du liquide où on les fait descendre à volonté lorsque l'on saisit l'appareil. Dans un autre modèle combiné par M. Dupré, c'est par un renversement de l'appareil que le contact s'établit. Ces appareils sont d'ailleurs assez rustiques

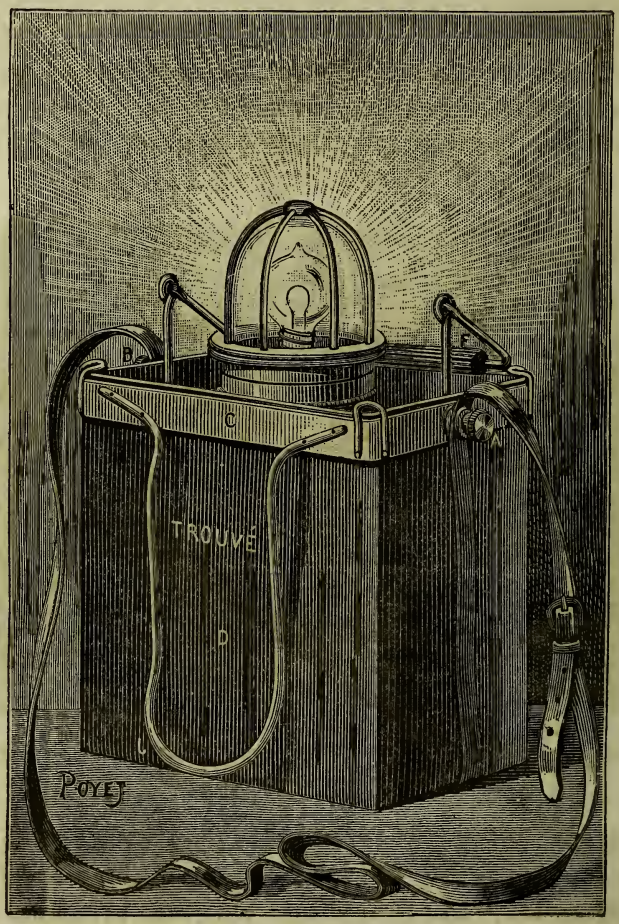


Fig. 291. — Lampe électrique de sûreté. (*G. Trouvé.*)

pour être vraiment pratiques ; sans prétendre qu'il n'est pas possible de leur donner une autre disposition plus satisfaisante, nous sommes convaincu qu'ils peuvent rendre des services et nous nous étonnons que leur emploi ne soit pas imposé dans un certain nombre de circonstances.

431. — L'étude de ce modèle a conduit M. Trouvé à construire une lanterne d'appartement qui ne s'allume que lorsqu'on la soulève pour la porter (fig. 292). Les électrodes sont portées par une tablette qui forme le fond supérieur d'un cylindre ; le vase rempli de liquide excitateur est placé à l'intérieur de ce cylindre ; au repos il porte

Fig. 292. — Lanterne d'appartement. (*G. Trouvé.*)

sur le sol, mais il est relié à une tige qui traverse la base supérieure du cylindre et qui se termine par une poignée; lorsqu'on saisit celle-ci et qu'on la soulève on entraîne d'abord le vase qui monte, mettant en contact le liquide avec les électrodes et faisant ainsi fonctionner la lampe; c'est seulement alors que le mouvement con-

tinuant entraîne le cylindre qui forme enveloppe. Ajoutons qu'un ingénieux système de baguettes articulées placées extérieurement empêche le renversement de la lanterne.

Nous ne saurions songer à passer en revue, même rapidement, toutes les circonstances dans lesquelles on peut utiliser les lampes à incandescence ; il est facile de les concevoir et nous nous bornerons à indiquer un usage où elle rendra certainement des services.

En enfermant la lampe dans une double enveloppe en verre, on peut sans inconvénient la plonger dans un liquide, même à basse température ; elle peut donc être utilisée ainsi dans un certain nombre de cas, notamment pour les travaux sous-marins exécutés à l'aide de scaphandres. Les fils conducteurs du courant sont alors fixés après le tuyau qui amène l'air.

432. Lampes a arc. Régulateurs. — Nous avons dit les difficultés qu'a présentées au début l'emploi de la lumière électrique par suite de l'usure des charbons qui amène la diminution d'intensité du courant, puis sa cessation ; il est clair que si, exceptionnellement, il est possible que l'opérateur s'astreigne à maintenir constant l'écartement des charbons, cette condition ne peut être acceptée industriellement ; il faut donc avoir recours à des appareils qui automatiquement produisent ce résultat : ces appareils sont ce que l'on appelle des régulateurs de lumière électrique ; nous allons en décrire quelques-uns choisis parmi ceux qui présentent les dispositions les plus caractéristiques et qui sont les plus employés ; nous indiquerons ensuite des systèmes dans lesquels, par diverses combinaisons on a pu résoudre le problème sans mécanisme à proprement parler, sans régulateur.

Si l'usure des charbons était régulière, invariable pour un même courant, un mécanisme d'horlogerie convenablement disposé ferait avancer les charbons d'une quantité égale à la longueur disparue par suite de la combustion, de telle sorte que la distance des pointes resterait invariable. Mais il n'est pas possible d'accepter cette solution : les meilleurs charbons, ceux qui paraissent le plus homogènes, ne présentent pas cette uniformité de combustion ; ils ne présentent jamais l'homogénéité absolue et la combustion se fait tantôt plus vite et tantôt plus lentement.

La solution, signalée presque simultanément, nous l'avons dit, par Foucault en France et par Staite en Angleterre, consiste à faire dépendre la marche du régulateur du courant même qui constitue l'arc ; ce courant, en effet, s'affaiblit quand la distance des charbons augmente, il devient plus intense lorsque cette distance diminue,

il reste constant (le moteur marchant régulièrement, cela va sans dire) si la longueur de l'arc est invariable; on comprend que l'on puisse utiliser ces relations pour déterminer l'action du régulateur. Un grand nombre d'appareils ont été construits; ils s'appuient tous sur cette idée.

Pour que la description de ces appareils soit plus aisée à suivre, nous établirons quelques principes généraux qui conduisent à une classification rationnelle, ou plutôt à diverses classifications suivant le point de vue auquel on se place.

433. — Tout d'abord et sans entrer dans le détail de l'installation générale d'un système d'éclairage, nous dirons que deux cas principaux peuvent se présenter : 1° une seule lampe à arc se trouve placée sur le conducteur traversé par le courant; 2° plusieurs lampes sont placées à la suite dans le même circuit; par analogie, avec les piles on dit quelquefois alors qu'elles sont montées en *tension* ou en *série*.

On peut avoir des lampes montées en quantité, pour compléter l'analogie, mais alors chaque lampe est seule dans un circuit; ce cas rentre donc dans le premier que nous avons signalé.

Pour une source constante de courant, pour une différence constante de potentiel aux extrémités du fil sur lequel est la lampe, l'intensité du courant ne peut varier qu'avec la longueur de l'arc et par suite, si le régulateur fonctionne lorsqu'il se produit des variations d'intensité, tout changement de distance entre les charbons amènera la mise en action du régulateur qui rétablira la distance.

Il n'en est plus de même si plusieurs lampes sont en série dans le même circuit; l'intensité du courant restera constante, malgré les variations individuelles de résistance de chaque lampe, si la *somme* des résistances des divers arcs ne change pas. Un régulateur basé sur les variations de l'intensité ne fonctionnerait donc pas malgré que les distances des charbons seraient les unes trop grandes et les autres trop faibles, pourvu que la condition énoncée ci-dessus fût satisfaite. Mais, par contre, il suffirait que, une seule lampe se dérangeant, le courant variât d'intensité pour que tous les régulateurs entrassent en action, agissant même sur les lampes pour lesquelles la distance n'aurait pas varié et serait celle qui convient. Pour ce cas, on a imaginé des régulateurs dont le fonctionnement ne dépend pas seulement des variations d'intensité, et qui se divisent en régulateurs à dérivations et régulateurs différentiels : nous reviendrons tout à l'heure sur les caractères de ces systèmes. Disons tout de suite, d'ailleurs, que si les systèmes basés sur l'intensité ne peuvent être appliqués aux lampes placées en série, les régulateurs

à dérivation ou différentiels, peuvent servir dans tous les cas.

434. — Le régulateur fonctionne quelquefois sous l'influence de rouages d'horlogerie, le plus souvent sous l'action de poids, principalement sous l'action du poids des pièces mobiles de l'appareil. Cette différence est de peu d'importance d'ailleurs et presque toujours on pourrait remplacer un des moteurs par un autre. Le moteur d'horlogerie présente l'inconvénient qu'il doit être remonté de temps à autre ; les régulateurs fonctionnant par le poids des pièces mobiles ne peuvent fonctionner que dans une position déterminée.

Quelquefois l'un des charbons est fixe et l'autre seul est mobile ; cette disposition est acceptable dans un grand nombre de cas, pour l'éclairage industriel par exemple, elle ne l'est pas lorsque la lampe fait partie d'un appareil d'optique (lanterne de projection, phare) où le point lumineux doit avoir une position absolument fixe. Il faut alors que les deux charbons se déplacent : si l'on emploie des courants alternatifs, les deux charbons s'usent également et leur avancement doit être le même. Si les courants sont continus le charbon positif s'use deux fois plus vite que le négatif, son avancement devra donc être deux fois plus grand. Disons encore que, à ce point de vue, il serait bien aisé en général de modifier un régulateur de manière à le rendre propre à servir soit dans un cas, soit dans l'autre.

Enfin le courant agit différemment dans les régulateurs ; tantôt il traverse un électro-aimant en face duquel se trouve une pièce mobile retenue par un ressort antagoniste ; c'est le mouvement de cette pièce mobile qui entraîne la marche du régulateur. Dans d'autres appareils le courant traverse un solénoïde ou bobine creuse dans l'axe de laquelle se trouve un barreau de fer doux qu'un ressort ou un contre-poids tend à faire sortir, mais que le passage du courant attire et tend à faire pénétrer dans la bobine, c'est le mouvement de ce barreau qui détermine le déplacement des charbons.

Ces généralités indiquées, il nous sera possible de passer rapidement en revue en indiquant le principe des principaux régulateurs, sans nous astreindre à l'ordre chronologique ; nous laisserons d'ailleurs de côté tous les détails accessoires.

435. — Régulateurs a variations d'intensité : systèmes Archereau, Gaiffe, Jaspar. — Parmi les régulateurs fondés sur les variations d'intensité des courants le plus simple est celui de M. Archereau (fig. 293) basé sur l'emploi du solénoïde. Il se compose d'une bobine creuse au centre de laquelle passe une tige GHK dont la partie supérieure est en fer doux ; cette tige qui porte le charbon inférieur C est constamment sollicitée à monter par l'action du poids P

agissant par l'intermédiaire d'un fil passant sur les poulies *p* et *p'*. Les fils qui amènent le courant sont fixés en T et T' ; le courant arrivant en T, par exemple, traverse la bobine, passe de là à la tige GH qui sert de porte-charbon, arrive au charbon inférieur C forme l'arc et traversant le charbon C' et les tiges qui servent à le supporter sort par T'.

Lorsque le courant ne passe pas le charbon C est appuyé, par l'action du poids P, sur le charbon C' qui est fixe ; le courant venant à passer la bobine attire le fer doux CH, le fait donc descendre, les

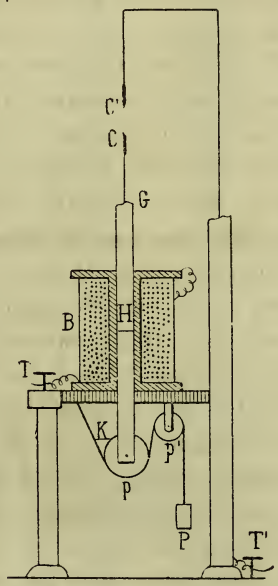


Fig. 293. — Principe du régulateur Archereau.

charbons s'écartent, l'arc prend naissance ; l'écartement des charbons est déterminé par la valeur du poids P qui a été choisi à l'avance et qui fait équilibre à l'action de la bobine pour l'intensité correspondant à cet écartement ; les charbons s'usant, le courant diminue d'intensité, l'action de la bobine s'affaiblit, le poids agit et soulève la tige CK avec le charbon. L'effet inverse se produirait si, pour une circonstance quelconque, la distance des charbons venait à diminuer.

Dans cet appareil, la fixité du charbon C', entraîne le déplacement de l'arc ; cet inconvénient est facile à éviter en rendant les charbons solidaires de manière que leurs déplacements soient toujours dans

le rapport de 2 à 1 qui est le rapport entre l'usure du charbon positif et celle du charbon négatif ; cette disposition est prise dans les appareils dont il nous reste à parler dans lesquels le poids P est généralement supprimé; c'est le poids de l'une des tiges pesantes qui portent les charbons qui sert de moteur.

436. — Le régulateur Gaiffe qui a de grandes analogies avec le régulateur Archereau contient ces dispositions avantageuses : en outre, il présente une amélioration importante destinée à régulariser l'action de la bobine qui ne conserve pas la même valeur pour les divers degrés d'enfoncement, les spires ne sont pas distri-

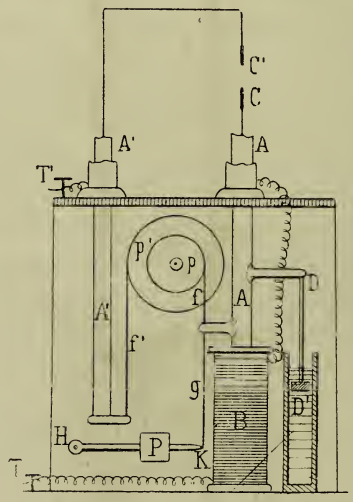


Fig. 294. — Principe du régulateur Jaspar.

buées uniformément et l'épaisseur de la bobine croît depuis le sommet jusque vers le milieu.

Dans le régulateur Jaspar, la tige A (fig. 294) qui porte le charbon inférieur C, se continue à sa partie inférieure par un cylindre de fer doux qui pénètre dans la bobine B et qui produit le réglage ; ses mouvements se communiquent à la tige A′, qui se recourbant porte le charbon supérieur C′, par l'intermédiaire des fils *f* et *f′* et des poulies *p* et *p′* montées sur le même axe et solidaires et dont les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2 ; les déplacements du charbon C′ qui est le charbon positif seront donc le double de ceux du charbon négatif C.

Pour donner plus de stabilité à l'arc et plus de douceur aux mou-

vements, deux dispositions sont employées. D'une part, à la tige A est relié un piston D′ qui pénètre dans un cylindre d'un diamètre un peu plus considérable contenant du mercure, de manière à présenter une certaine résistance au mouvement. D'autre part la tige A par l'intermédiaire du fil est reliée au levier HK mobile en H et portant un contrepoids P destiné à équilibrer le système ; ce

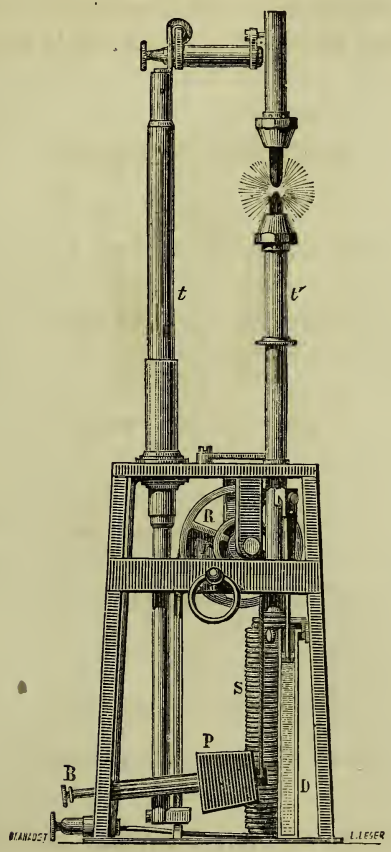


Fig. 295. — Lampe Jaspar. (*La Lumière électrique.*)

poids peut se déplacer de manière à pouvoir faire varier la sensibilité de l'appareil.

L'action de la bobine est variable comme dans le régulateur Archereau ; on compense ce défaut par l'addition d'un contrepoids excentrique placé sur la poulie p'.

Il n'y a pas à insister sur le mode de fonctionnement du régula-

teur qui est absolument le même que celui du régulateur Archereau.

Les régulateurs à solénoïdes présentent l'avantage de donner aux charbons des mouvements dans l'un et l'autre sens, approche ou recul, jusqu'à ce que l'action de la bobine ait une valeur déterminée qui est fixée par la position du contrepoids P dans le régulateur Jaspar et par l'action d'un ressort placé dans un barillet pour le régulateur Gaiffe. Comme nous allons le voir cette propriété n'existe pas pour tous les régulateurs à électro-aimants dont le moteur est le poids même d'une pièce de l'appareil : on la retrouve cependant

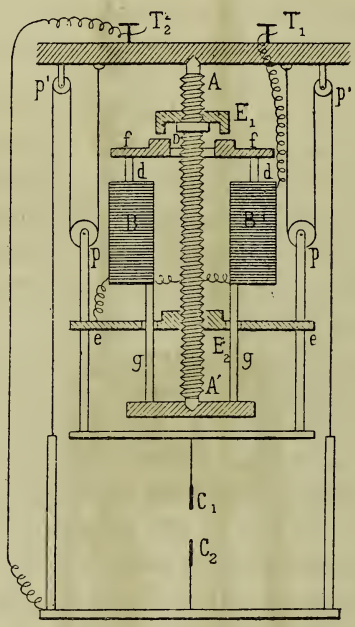


Fig. 296. — Principe du régulateur Cance.

dans un régulateur Foucault qui fonctionne bien mais dont les dispositions sont moins simples.

437. Régulateur Cance. — Dans le régulateur Cance le mouvement du charbon est déterminé par le poids même de la traverse à laquelle est fixé le porte-charbon, comme cela a lieu dans d'autres appareils, mais ce qui caractérise ce système c'est la nature et la forme du frein qui ralentit et même arrête le mouvement.

La pièce principale est une vis à pas allongé AA′ (fig. 293) placée verticalement et qui tourne librement autour de son axe, ses extrémités présentant des parties lisses qui se meuvent dans des coussi-

nets ou crapaudines ; vers la partie supérieure est fixée sur la vis une bague D ; de plus deux écrous E_1 et E_2 sont enfilés sur la vis. Le premier E_1 repose sur la bague D et tourne avec la vis, au moins en général, l'autre E_2 est lié à une traverse *e e* guidée dans son mouvement par des tiges verticales *g g*, il ne peut donc que se déplacer parallèlement à l'axe de la vis, sans tourner ; c'est à cette traverse qu'est fixé le cadre qui porte le charbon supérieur C_1 ; le cadre inférieur C_2 qui porte l'autre charbon peut être fixe. Le plus souvent il se meut en même temps que le cadre supérieur, ces deux cadres étant reliés par des fils qui passent sur un système de poulies fixes *p* et de poulies mobiles *p'* constituant des moufles qui assurent le rapport de 1 à 2 qui doit exister entre les déplacements des deux charbons.

D'autre part, se trouvent deux bobines B_1B traversées par le courant et à l'intérieur desquelles peuvent se mouvoir des tiges de fer doux *d d* qui prolongées extérieurement à la partie supérieure supportent une traverse *f f* qui laisse passer librement la vis et peut venir s'appliquer sur la base inférieure de l'écrou E_1. Ces bobines sont intercalées dans le circuit qui, commençant en T_1, contient l'arc et vient aboutir à T_2.

Au repos, le charbon supérieur C_1 est en contact avec le charbon C_2, la descente s'effectuant directement sous l'influence des poids de l'écrou E_2, de la traverse *ee* et du cadre supérieur. Lorsque le courant passe les bobines agissent sur les fers doux qu'elles contiennent et qui s'élèvent entraînant la traverse *f f* qui vient s'appuyer par une large surface sous l'écrou E_1 qui est soulevé ; comme par suite du frottement qui prend alors naissance il ne peut tourner, son mouvement ascendant entraîne nécessairement la rotation de la vis. L'écrou E_2 qui ne peut tourner sera soulevé par suite de cette rotation ; les charbons s'écarteront, l'arc sera formé.

Lorsque l'usure a augmenté la longueur de l'arc, par suite de l'accroissement de résistance le courant diminue d'intensité, les fers doux des bobines descendent et avec eux la traverse *f f ;* l'écrou E_1 vient reposer sur la bague D_1 mais rien ne s'oppose à la rotation de la vis qui se produit sous l'influence des poids moteurs amenant la descente de l'écrou E_2. Le courant croît peu à peu, la traverse *f f* se relève et venant appuyer sous l'écrou E_1 l'empêche de tourner, la vis est donc immobilisée ainsi que l'écrou E_2 et le charbon jusqu'à un nouvel affaiblissement du courant.

Ce système donne de bons résultats pratiques.

438. — Régulateur Bürgin. — L'un des régulateurs les plus

simples parmi ceux qui emploient des électro-aimants agissant sur un contact placé à distance est le régulateur Bürgin (fig. 300). Il com-

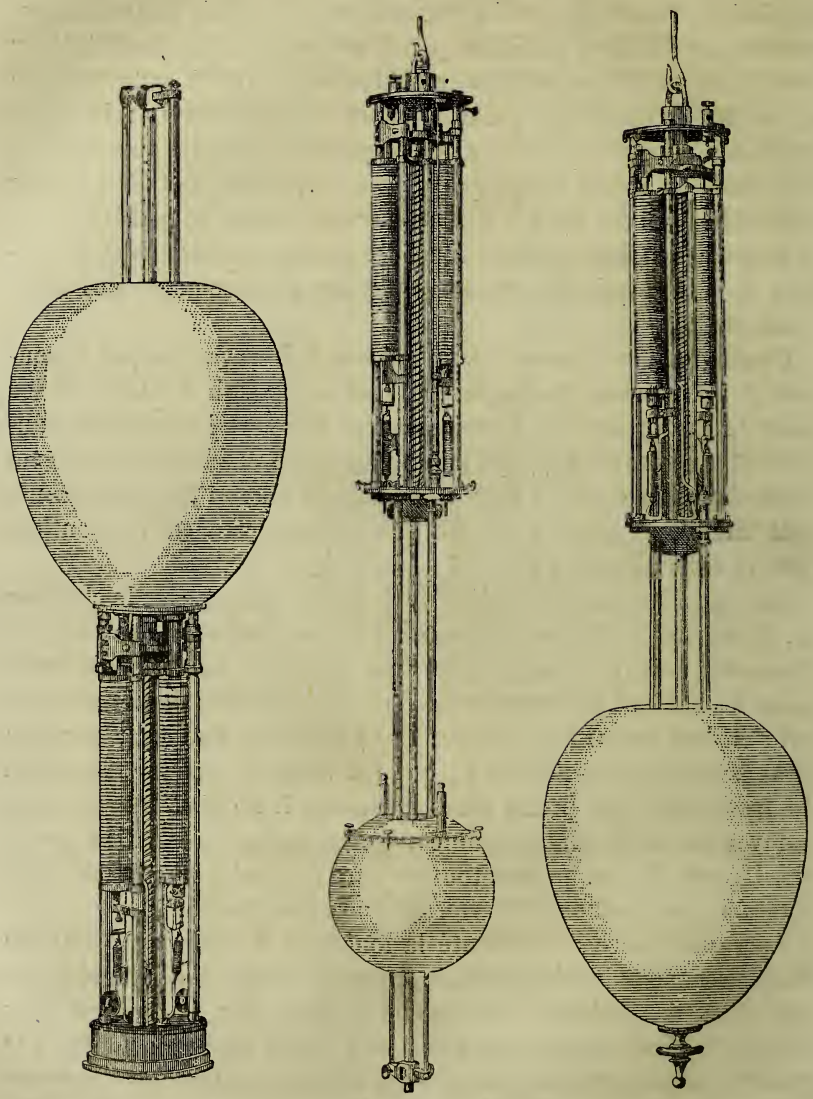


Fig. 297, 298, 299. — Modèles divers du régulateur Cance.

prend deux tiges AA et A'A' qui servent de supports aux crayons et qui sont reliés entre elles par l'intermédiaire des fils f et f' passant sur les poulies p et p' montées sur un même axe, solidaires, et dont

les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2, de telle sorte que le déplacements des charbons C et C′ ont lieu en sens contraire et sont dans le rapport de 1 à 2, rapport nécessité par l'usure inégale de ces charbons. La tige AA est très pesante et tend, par sa descente, à produire le mouvement du système ; mais ce mouvement peut être empêché par l'action d'un ressort F agissant comme frein en pressant par son extrémité sur la jante d'une roue R portée sur le même axe que les poulies *p* et *p′* dont elle est solidaire. L'axe commun n'est pas fixe, il est porté sur une tige LMN liée à un parallélogramme articulé MM′NN′ dont les sommets M′ et N′ sont fixes.

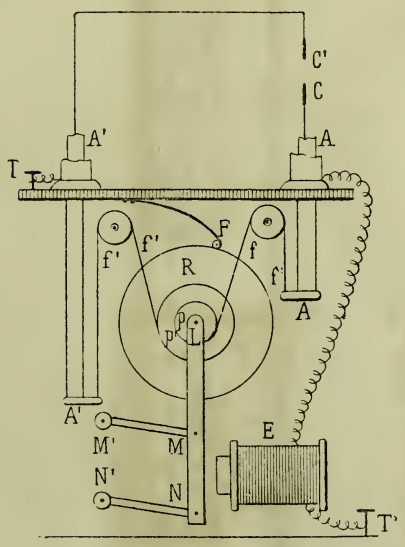


Fig. 300. — Principe du régulateur Bürgin.

Lorsque le parallélogramme s'abaisse, le frein cesse d'agir, la roue et les poulies peuvent tourner les charbons se rapprochent ; mais par suite de ce rapprochement, lorsque l'arc existe, le courant augmente d'intensité. Le courant passe dans un électro-aimant E, placé en face de la branche verticale MN du paraléllogramme, branche qui est en fer doux ; lorsque le courant a atteint une intensité déterminée correspondant à la grandeur de l'arc que l'on veut maintenir, il attire la pièce MN malgré le poids des pièces qui y sont fixées ; cette pièce et le système des roues sont alors relevés et la roue R vient frotter entre le frein qui arrête le mouvement des roues et par suite celui des charbons. Si alors, par suite de l'usure du charbon,

le courant s'affaiblit, l'électro-aimant devient insuffisant, la tige MN s'abaisse, les roues tournent, les charbons se rapprochent.

Au repos, les charbons sont en contact ; lorsque l'on ferme le circuit, le courant passe avec une grande intensité, les roues se relèvent rapidement, par suite de ce mouvement les fils *f* et *f'* sont détendus ce qui permet un léger déplacement des tiges A et A' ; par suite l'écart des charbons et la formation de l'arc se produisent.

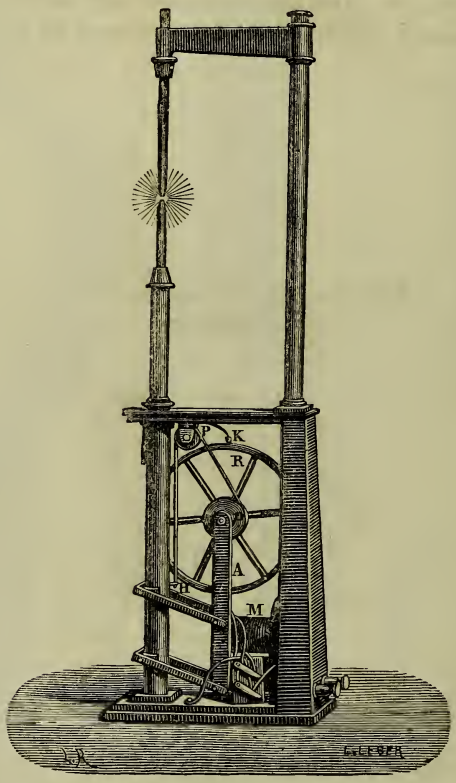


Fig. 301. — Lampe Bürgin (*La Lumière électrique.*)

Dans quelques modèles, la disposition est un peu simplifiée : un seul charbon est mobile, le charbon inférieur, ce qui entraîne la suppression d'un fil et des poulies correspondantes (fig. 301).

Cet appareil est d'un bon usage.

439. Régulateur Serrin. — L'appareil Serrin qui est d'un fonctionnement très régulier et qui est usité depuis longtemps en France dans les phares électriques est un peu plus compliqué.

Le porte-charbon C′ (fig. 302) est constitué par une tige A′A′ pesante munie d'une crémaillère qui engrène avec une roue dentée p' qu'elle fait tourner lorsqu'elle descend sous l'action de son poids. Le mouvement de la roue p' produit deux effets : le premier est de faire tourner le rouage d'horlogerie comprenant les roues r, r' et leurs pignons ce qui provoque la rotation rapide d'un volant à ailettes v. Le second est le relèvement du charbon C ; à cet effet, sur une poulie p, solidaire de p', d'un diamètre moitié moindre et est fixé un fil f qui changeant de direction sur la poulie q vient s'attacher par son autre extrémité à la pièce a reliée à la tige AA qui porte le charbon C ; le mouvement de C′ entraîne donc un déplacement en sens

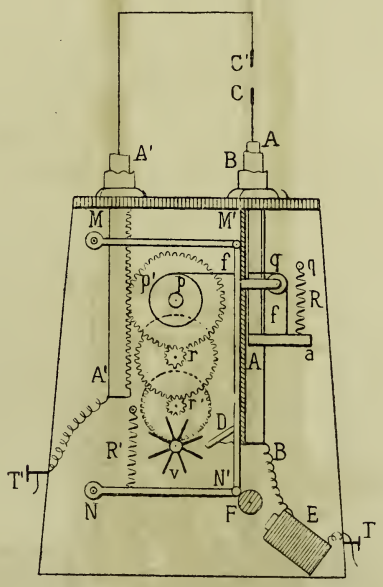


Fig. 302. — Principe du régulateur Serrin.

inverse de C, déplacement qui serait toujours exactement la moitié de celui de C si l'axe de la poulie q était fixe, ce qui n'est pas, comme nous allons le dire.

La tige AA passe dans une pièce cylindrique creuse BB, fendue dans sa longueur pour livrer passage à la pièce a, et c'est sur B qu'est fixé le châssis qui porte l'axe de la poulie q. Il résulte de là que, lors même que la roue p' ne tourne pas, que, par suite, le fil ne s'enroule pas sur p, la tige AA peut-être déplacée s'élevant en même temps que B et s'abaissant en même temps, puisque la poulie q monte et descend aussi avec B.

Voyons comment on a tiré parti de ces connexions pour produire la régulation de l'arc.

La tige creuse BB n'est pas indépendante, elle est reliée au côté

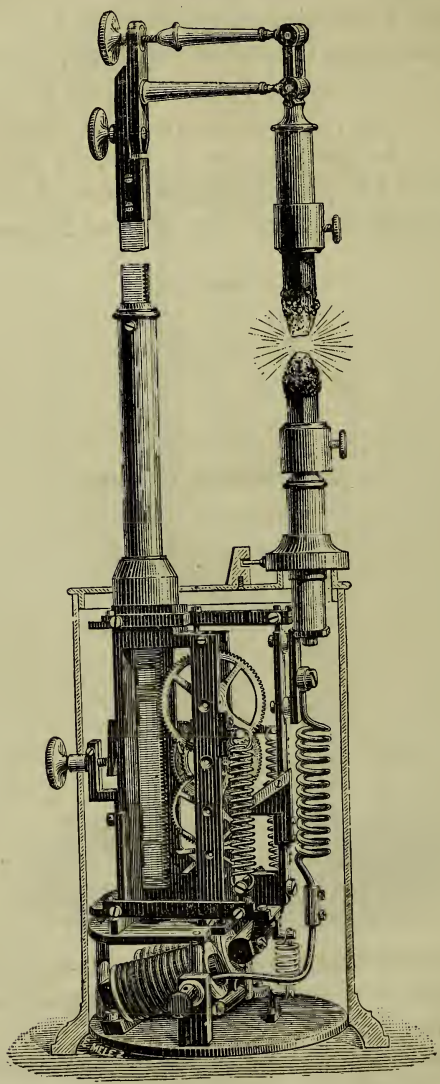


Fig. 303. — Régulateur Serrin. (*Suisse.*)

vertical M'N' d'un parallélogramme articulé MM' NN' dont les sommets M et N sont fixes. Le côté vertical M'N' porte un doigt D qui lors de l'abaissement vient rencontrer le volant à ailette *v*, et arrête

son mouvement, empêchant ainsi le mouvement des roues r', r, p, et par suite la descente de la tige à crémaillère A'A'. Le parallélogramme est normalement soulevé par l'action du ressort R', alors le doigt D n'est pas en prise et le mouvement du rouage est libre. Mais à la partie inférieure, la tige M'N' porte une pièce de fer doux F qui se déplace devant un électro-aimant E traversé par le courant ; quand, le courant ayant atteint une certaine intensité, l'action de l'électro-aimant est devenue supérieure à celle du ressort R' l'attraction se produit et la tige M'N' s'abaisse entraînant avec elle BB et la poulie q jusqu'à venir mettre en prise le doigt D et le volant à ailettes v.

Ceci posé lorsque l'appareil est au repos, le ressort relève la tige NN', les roues tournent, la pièce A' descend, la tige A' monte, les charbons arrivent au contact. Si alors on lance le courant, l'électro-aimant agit, la tige M'N' s'abaisse et le doigt D s'oppose au mouvement du volant à ailettes v et, par celui-ci, à celui de toutes les roues et de la crémaillère, le charbon C' est donc immobilisé. Mais par suite de l'abaissement de M'N' la tige B est descendue et avec elle la poulie q et par suite aussi la tige AA et le charbon C ; les charbons s'écartent, l'arc se forme.

Par l'usure des charbons, l'arc augmente de longueur, le courant diminue d'intensité, l'électro-aimant s'affaiblit, le parallélogramme remonte sous l'action du ressort R', le doigt D dégage le volant v, le rouage d'horlogerie commence à tourner, la tige A'A' descend en même temps que le charbon C ; le charbon C' monte d'une part, par l'élévation de la poulie q entraînée avec B et avec M'N', d'autre part par l'enroulement du fil ; cette dernière action subsiste seule, d'ailleurs, car dès que le courant a atteint l'intensité correspondant à la grandeur de l'arc qui a été fixée, l'électro-aimant entre en action, comme précédemment, abaissant F, la tige B et la poulie q, la tige M'N' et le doigt D qui vient arrêter le mouvement du rouage.

En remplaçant l'action du poids de la tige A'A' comme moteur par celle d'un ressort, M. Serrin a construit un appareil fonctionnant d'une manière tout à fait aussi satisfaisante dans une position quelconque. Cette condition est indispensable pour le cas où le régulateur doit être placé à bord d'un navire.

Nous passons sur divers détails de construction qui ne modifient pas le mode de fonctionnement de cet appareil et nous signalons seulement la manière particulière dont le porte-charbon C' est relié à la tige A'A' : le porte-charbon est articulé à la tige fixe par un genou sphérique, on peut faire varier sa direction soit en agissant

sur la vis qui allonge ou raccourcit la bielle, soit en tournant l'excentrique : il est alors toujours facile d'amener le charbon C′ juste en face du charbon C.

440. Régulateur Foucault. — Le régulateur Foucault présente des dispositions toutes particulières et satisfait à une condition qui ne se retrouve pas dans tous les autres appareils; non seulement il produit le rapprochement des charbons qui sont trop éloignés, mais il produit l'éloignement de ceux-ci lorsqu'ils sont trop rapprochés.

Nous allons donner une idée générale du système en réduisant la partie mécanique autant qu'il est possible (fig. 304).

Les deux charbons C_1 et C_2 sont montés sur des porte-charbons

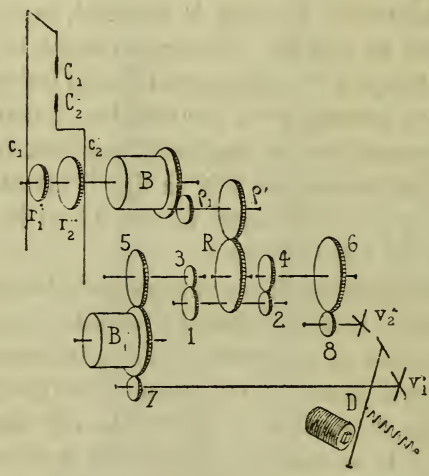


Fig. 304. — Principe du régulateur Foucault.

munis de crémaillères c_1 et c_2 engrenant avec deux roues dentées r_1 et r_2 calées sur le même axe et dont les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2, rapport égal à celui de l'usure des charbons lorsque l'arc est produit par un courant continu. Ces roues sont montées sur l'axe d'un barillet B dont le mouvement tend à rapprocher les charbons. Par l'intermédiaire des roues ρ et ρ' le barillet B peut faire tourner la roue R qui joue un rôle capital dans le fonctionnement du mécanisme, elle fait partie d'un rouage satellite qui présente les connexions suivantes : la roue R porte excentriquement un axe qui tourne avec elle et sur lequel sont calées les roues 1 et 2; celles-ci engrènent avec les pignons 3 et 4 dont les axes ont même direction que celui de la roue R dont ils sont le

prolongement, mais auquel ils ne sont pas reliés. Par l'intermédiaire des roues et des pignons 6 et 8 (il y en a un plus grand nombre en réalité), le mouvement de la roue 4 est solidaire de celui du volant à 4 ailettes v_2. D'autre part, de même, le mouvement de la roue 3 est solidaire de celui du volant à 4 ailettes v_1 par l'intermédiaire du système des roues 5 et 7 et du barillet B_1. Entre les deux volants à ailettes se trouve une pièce oscillante D en forme de T qui est sous l'influence de l'électro-aimant régulateur dont nous expliquerons le fonctionnement plus loin; la branche horizontale du T peut toucher à la fois les deux volants et arrêter leur mouvement quand cette pièce est dans sa position moyenne, mais en se portant de l'un ou de l'autre côté elle dégage l'un ou l'autre volant qui peut dès lors entrer en mouvement.

Le régulateur est disposé de telle sorte que quand le courant a l'intensité pour laquelle il doit fonctionner, la pièce D est à sa position moyenne, tout mouvement est impossible, les charbons restent immobiles. Les charbons venant à s'user, le courant s'affaiblit et la pièce D est déplacée par l'action de l'électro-aimant régulateur de manière à se rapprocher de la roue v_1, ce qui immobilise le système 7,B',5 et 3, mais rend libre l'autre système qui se met en mouvement sous l'influence du barillet B, et les charbons se rapprochent jusqu'à ce que, ceux-ci ayant la distance normale, la pièce D revienne à sa position moyenne et arrête le mouvement qui s'était produit.

Supposons au contraire que, par suite d'une circonstance quelconque, les charbons soient trop rapprochés, l'électro-aimant régulateur entraîne la pièce D vers le volant v_2 qui sera arrêté ainsi que le système 8,6,4; mais l'autre système pourra se mettre en mouvement, ce qu'il fera sous l'influence du barillet B_1; par l'intermédiaire du rouage satellite ce mouvement se communique aux roues ρ' et ρ_1 et par suite aux roues r_1 et r_2 et aux crémaillères, le mouvement est inverse de celui que produirait directement le barillet B, les charbons s'écarteront donc jusqu'à ce que, l'arc ayant repris sa longueur normale et l'intensité ayant atteint la valeur déterminée, la pièce D revienne à sa position moyenne et arrête tout mouvement.

Pour que les mouvements se produisent dans les conditions convenables, il faut que les roues du rouage satellite aient des dentures convenablement choisies; mais il est inutile d'entrer dans ces détails et il nous suffit d'avoir fait comprendre le principe.

Le système de régulation est également fort simple à concevoir en principe : la pièce D est soumise à deux actions simultanées et opposées, celle d'un électro-aimant qui est traversé par le courant

et celle d'un ressort antagoniste dont on a réglé la tension à volonté; quand l'action de l'électro-aimant est égale à celle du ressort, la pièce D est à sa position moyenne; si le courant devient trop faible,

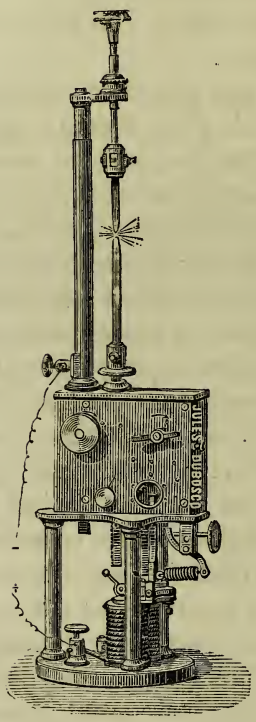


Fig. 305. — Régulateur Foucault.
(*J. Duboscq.*)

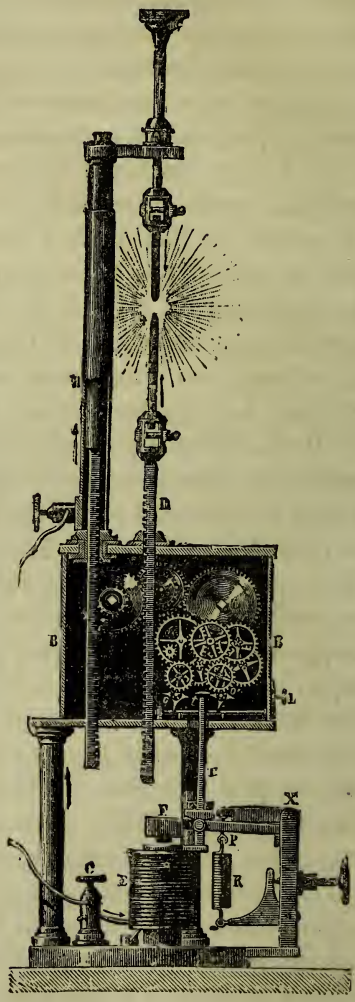


Fig. 306. — Coupe du régulateur Foucault.
(*La Lumière électrique.*)

l'action du ressort est supérieure à celle de l'électro-aimant, la pièce D est entraînée du côté de la roue v_1; c'est l'inverse qui se produit si le courant devient trop fort.

441. — En réalité, Foucault a introduit une disposition particu-

lière dans le fonctionnement de l'électro-aimant en lui appliquant le répartiteur de Robert Houdin que celui-ci avait imaginé pour un système d'horloge électrique. Nous ne pouvons mieux expliquer l'importance de cette modification qu'en transcrivant les lignes suivantes de Foucault :

« Le défaut commun aux divers modèles de régulateur usités jusqu'ici est que l'armature disposée en regard de l'électro-aimant se trouve, à l'égard des forces qui la sollicitent (magnétisme développé dans l'électro-aimant par le passage du courant générateur de la lumière et ressort antagoniste dont la force mécanique doit établir l'équilibre), dans un état d'équilibre instable et, par suite, obligée de se précipiter sur l'un ou sur l'autre des arrêts qui limitent sa course sans jamais pouvoir séjourner entre eux deux. Cet inconvénient, déjà très grave dans les autres appareils, aurait encore davantage compromis la fonction de celui-ci, car il eût été soumis à une oscillation perpétuelle.

» Le ressort antagoniste n'agit plus directement sur l'armature,

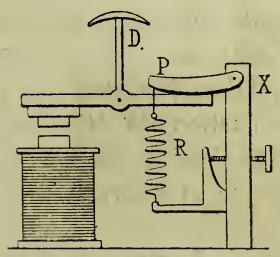


Fig. 307. — Répartiteur.

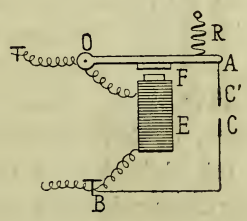


Fig. 308. — Principe des régulateurs à dérivation.

mais il est appliqué à l'extrémité P (fig. 307) d'une pièce articulée en un point fixe X et dont le bord, façonné suivant une ligne courbe particulière, presse, en roulant, sur un prolongement qui représente ainsi un levier de longueur variable. L'armature doit donc toujours rester *flottante* entre les deux positions limites; car, à chaque instant, la force antagoniste opposée par l'action du ressort à la puissance attractive de l'électro-aimant est compensée par l'*effet de levier* ainsi produit. La position de l'armature est, autrement dit, à chaque instant, l'expression de l'intensité du courant de la source électrique. »

Ce régulateur construit avec beaucoup de soin par M. Duboscq, fonctionne très bien; le point lumineux reste fixe à la position qu'on lui a donnée primitivement en faisant mouvoir directement au

début la position du charbon supérieur. Mais cet appareil est délicat et il ne peut guère être utilisé que dans les laboratoires ou dans quelques circonstances spéciales.

442. Régulateurs a dérivation. — Dans les régulateurs dits à dérivation, le courant qui produit l'arc n'est pas celui qui agit sur le système de régulation; celui-ci est sous la dépendance d'un courant dérivé passant dans un circuit spécial dont les extrémités rejoignent le circuit général de part et d'autre de l'arc voltaïque. Voici une disposition schématique qui fait comprendre le principe :

Soient O (fig. 308) le point d'arrivée du courant, B son point de sortie; OA un levier conducteur mobile autour de O qui supporte à une extrémité le charbon C′, ce levier présente en F une pièce de fer doux et en R un ressort qui tend à le relever : au-dessous de F se trouve un électro-aimant E qui reçoit le courant par un fil partant de O, par exemple, et l'amène en B au circuit général. Pour une différence de potentiel supposée constante entre O et B lorsque l'arc a une longueur convenable et par suite une résistance déterminée, l'action du ressort R est plus forte que celle de l'électro-aimant, le levier OA est immobile; mais si, par suite de l'usure des charbons, la résistance de l'arc augmente, l'intensité du courant croît dans l'électro-aimant, puisque dans les dérivations les intensités sont en raison inverse des résistances. Alors l'action de l'électro-aimant augmente, devient prépondérante, vainc l'action du ressort et le levier OA s'abaisse en même temps que le charbon C′, ce qui diminue la grandeur de l'arc.

Pour ne pas perdre une fraction notable du courant, il faut que la résistance de la dérivation OEB soit grande par rapport à celle du circuit principal OCC′B contenant l'arc; on emploiera donc du fil fin et pour que l'action de l'électro-aimant puisse alors être suffisante, il faudra employer des électro-aimants à spires très nombreuses.

On remarquera que dans ces appareils à dérivation l'électro-aimant augmente de puissance lorsque l'arc s'allonge, c'est l'inverse pour les régulateurs basés sur les variations d'intensité du courant. Il résulte de là que, au repos, les charbons sont normalement écartés; l'arc ne pourrait donc pas s'établir, et il faut une disposition spéciale pour assurer le commencement de l'éclairage. Il est bon également d'employer des procédés qui évitent les inconvénients qui pourraient se produire (fusion des fils, détérioration de la couche isolante) si, par suite de la rupture d'un charbon, par exemple, le courant venait tout entier à passer dans le fil de l'électro-aimant.

443. Régulateur A. Gérard. Veilleur automatique. — Parmi les régulateurs à dérivation les plus simples, on peut citer celui de M. Anatole Gérard. Voici la description schématique qui permet de comprendre aisément son fonctionnement (fig. 309) :

AA est une tige verticale qui porte le charbon C_2 ou même c'est le charbon; il tend à descendre par son propre poids, dirigé dans son mouvement par des guides ou glissières. BB est un cadre qui porte le charbon C_1 et qui est lié à un portant en fer doux HH, également guidé par des glissières GG mais qui ne peut dans aucun cas s'écarter beaucoup de l'électro-aimant E qui est placé en dérivation entre les points T et T′ où aboutissent les fils de la machine, généralement à courants alternatifs.

Le mouvement de descente du charbon C_2 est enrayé par l'action

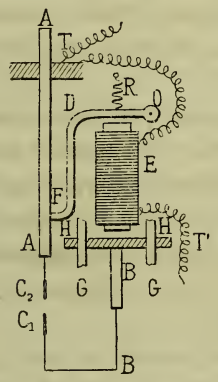


Fig. 309. — Principe du régulateur Gérard.

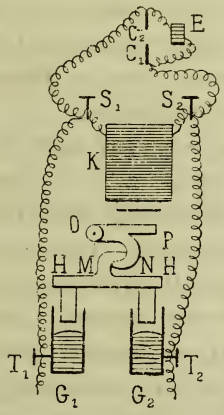


Fig. 310. — Principe du veilleur automatique.

d'un frein F qui appuie sur lui : ce frein est porté à l'extrémité d'un levier coudé FDO, mobile autour du point O, dont la branche horizontale est dans le voisinage de la partie supérieure de l'électro-aimant et est soumise à l'action du ressort R qui tend à la relever et par suite à appuyer le frein sur la tige A et à arrêter sa descente. Au repos, les charbons sont écartés; quand le courant commence, il passe tout entier dans l'électro-aimant qui agit à la fois sur OD et sur HH; le levier ODF étant attiré, le charbon C_2 rendu libre descend, pendant que le charbon C_1 est soulevé par suite de l'attraction subie par HH. Les deux charbons se rencontrent et le courant s'établit à travers eux; par suite l'électro-aimant entre en dérivation, sa puissance diminue, il cesse d'attirer OD et le levier se relevant, le

frein F agit et arrête la descente du charbon; il cesse d'attirer HH, le charbon C_1 descend brusquement, s'écartant ainsi de C_2 et formant l'arc. Les choses resteront en cet état jusqu'à ce que, les charbons s'usant, la résistance de l'arc augmentant, le courant dérivé qui traverse l'électro-aimant devienne assez puissant pour attirer OD et laisser descendre le charbon C_2, mais ce mouvement cesse rapidement parce que la résistance de l'arc diminue par suite de ce rapprochement même, que le courant dérivé devient moins intense, par conséquent.

On voit que dans le régulateur Gérard, sauf au début, le charbon inférieur ne se déplace pas, le charbon supérieur descend constamment, par conséquent le point lumineux se déplace, descendant aussi par l'usure des charbons

Le bon fonctionnement de cet appareil paraît facilité par l'alternance des courants qui donne à tout l'appareil une sorte de frémissement qui rend moins brusque l'action du frein. Il faut reconnaître, par contre, que ce frémissement constitue un bruit qui n'est pas sans inconvénient.

444. — Si, par suite d'une brusque extinction de l'arc, par une cause quelconque, le courant venait à passer tout entier pendant un certain temps dans l'électro-aimant, celui-ci pourrait subir des détériorations. Pour les éviter, M. A. Gérard joint à chaque lampe un appareil, dit *veilleur automatique*, qui, lors d'une augmentation notable du courant, établit un shunt et réduit presque à rien le courant qui traverse le régulateur.

Le veilleur automatique comprend deux godets en fer G_1 et G_2 (fig. 310) pleins de mercure et communiquant aux bornes T_1 et T_2 où aboutissent les fils de la machine. Au-dessus de ces godets est une pièce en fer assez lourde présentant deux extrémités recourbées verticalement correspondant aux deux godets dans lesquels elles pénètrent légèrement sans toucher ni les parois, ni le mercure. Cette pièce HH est maintenue soulevée parce que, dans un crochet M qu'elle présente à la partie supérieure, s'engage un crochet N qui fait partie d'un levier recourbé NOP mobile autour du point O.

Des bornes T_1 et T_2 partent des conducteurs qui vont aboutir à la lampe représentée schématiquement par deux crayons C_1 C_2 et par l'électro-aimant E; mais entre ces conducteurs, entre les points S_1 et S_2 on a établi une dérivation très résistante constitué par un fil très fin enroulé autour de l'électro-aimant K qui est placé au-dessus du levier OP.

Tant que la lampe C_1C_2 fonctionne normalement, il ne passe dans

l'électro-aimant K qu'un courant très minime qui ne produit aucune action. Mais si le courant est interrompu entre C_1 et C_2 son intensité augmente à la fois dans l'électro-aimant E où il faut éviter les effets fâcheux qu'elle peut produire et dans l'électro-aimant K qui devenant assez puissant attire le levier OP, fait basculer le crochet N et dégage le crochet M; la pièce HH tombe, établissant ainsi par l'intermédiaire du mercure un *court-circuit* par lequel passera dès lors la presque totalité du courant, les courants circulant dans les électro-aimants sont alors trop faibles pour produire aucun effet appréciable.

Lorsque l'appareil est remis en état, on soulève la pièce HH et on la maintient en engageant les crochets M et N.

Dans les modèles récents, les deux godets sont placés l'un au-dessus de l'autre (fig. 311), mais le fonctionnement est le même, d'une manière général.

445. Régulateur Gramme. — Le régulateur Gramme, basé sur le même principe, présente quelques dispositions spéciales.

Le charbon positif C′ (fig. 312) est porté à la partie inférieure d'une tige pesante A′A′ présentant latéralement une crémaillère qui engrène avec une roue dentée *r* communiquant, par l'intermédiaire de roues et de pignons, un rapide mouvement de rotation au volant à ailettes *v*. Celui-ci peut buter contre un doigt *d* qui l'empêche de tourner et arrête par là même le mouvement du rouage et la descente de la tige à crémaillère.

Le doigt *d* est placé à l'extrémité du levier *dog*, mobile autour du point *o* et dont l'autre extrémité *g*, relevée par l'action du ressort R′ peut être attirée par l'action de l'électro-aimant E′ lorsque le courant traverse celui-ci. Cet électro-aimant est placé en dérivation, les extrémités T′ et *t*′ du fil qui y aboutit se trouvant de part et d'autre de l'arc, mais il n'y a pas continuité dans ce circuit dérivé; le fil partant de T′ aboutit à l'axe *o* du levier *dog* passe par la pointe *i* qui appuie sur la pièce à ressort *h*, cette pièce est reliée directement au fil de l'électro-aimant : le courant passera donc dans l'électro-aimant E′ quand le levier *dog* obéira à l'action du ressort R′, ce qui établira le contact entre *i* et *h*, mais il cessera lorsque ce levier étant attiré par l'électro-aimant il y aura séparation des pièces *i* et *h*.

Comme nous le dirons tout à l'heure, ce mécanisme assure le réglage de l'appareil; une autre partie amène la production de l'arc.

Le charbon négatif C est porté par un cadre AA qui peut se mouvoir verticalement dans de petites limites, il est soulevé par un ressort

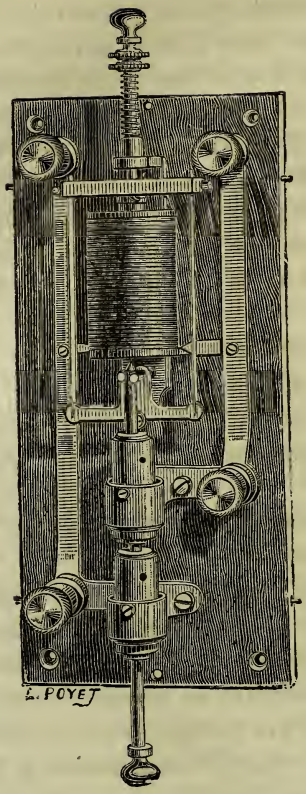


Fig. 311. — Veilleur automatique (*A. Gérard*).

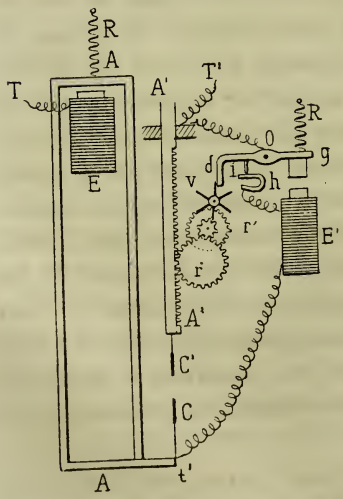


Fig. 312. — Principe du régulateur Gramme.

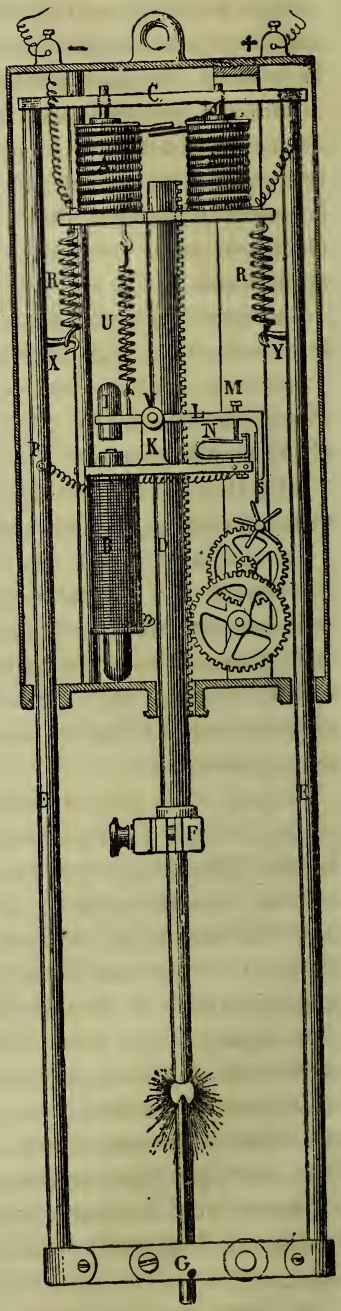


Fig. 313. — Régulateur Gramme.

R qui tend à l'éloigner de l'électro-aimant E situé au-dessous d'un morceau de fer doux qui constitue la partie supérieure du cadre. Cet électro-aimant à gros fil est placé dans le circuit principal, il est donc traversé par le courant entier.

Au repos les charbons se touchent, le charbon C et le cadre A étant soulevés par le ressort R, le rouage *rr'* et le mouvement du charbon sont arrêtés parce que le doigt *d* est en prise avec le volant à ailettes. Si l'on établit le courant, au début la presque totalité passe par les charbons, l'électro-aimant E' traversé par un très faible courant de dérivation ne peut vaincre le ressort R', la tige A' est donc immobilisée. Mais le courant principal traversant l'électro-aimant E, le fer doux A est attiré malgré le ressort, le cadre s'abaisse ainsi que le charbon C, l'arc se forme. Lorsque par l'usure des charbons, la distance des charbons aura augmenté, augmentant la résistance de cette partie, l'intensité du courant dérivé se sera accrue et l'électro-aimant qu'il anime deviendra à un certain moment assez puissant pour attirer le levier *og* malgré le ressort R'; le volant à ailettes sera dégagé, le rouage tournera et le charbon C' descendra, mais cette action sera de très courte durée, car le mouvement du levier aura rompu le courant entre *i* et *r* l'électro-aimant deviendra donc inactif et le levier revenant à sa position primitive, le doigt *d* arrêtera de nouveau le mouvement; mais si la distance des charbons est encore trop grande, le mouvement recommencera et ainsi de suite, autant de fois qu'il sera nécessaire pour amener la distance convenable.

Comme dans la lampe Gérard, le charbon inférieur s'use sans se déplacer, le point lumineux ne reste donc pas fixe.

446. Régulateur de Mersanne. — Dans le régulateur de Mersanne qui fonctionne avec des courants alternatifs, on a cherché, en particulier, à pouvoir employer des crayons de grande longueur de manière à ce que la lampe puisse fonctionner pendant les longues nuits d'hiver sans qu'il soit nécessaire de s'en occuper.

Pour arriver à ce résultat les charbons sont maintenus directement par des galets à gorge *gg g'g'* (fig. 314) qui leur donnent une direction fixe dans l'espace. Ordinairement les crayons sont horizontaux. Les galets *gg* reçoivent d'un rouage d'horlogerie à ressort un mouvement de rotation qui a pour effet de faire avancer les charbons l'un vers l'autre; c'est ce mouvement de rotation qu'il faut soumettre à l'action du régulateur pour que la longueur de l'arc reste constante Voici comment on obtient ce résultat :

Le ressort contenu dans le barillet B, lorsqu'il est bandé agit sur

deux systèmes différents : d'une part, par les roues d'angle il fait tourner l'axe horizontal XX; d'autre part il communique son mouvement aux systèmes de roues et de pignons *r t* système qui se termine par un volant à ailettes *v*. L'axe XX est formé de deux parties métalliques séparées par une pièce isolante I; c'est cet axe qui par l'intermédiaire des roues d'angles $\rho_1\rho_2\rho_3\rho_4$ fait tourner les galets *gg;* les galets *g'g'* qui servent de support tournent également par suite de l'entraînement des charbons; la même disposition se retrouve identiquement pour le charbon C'C'. Il est utile de remarquer que l'on peut faire tourner les boîtes qui contiennent les galets et les roues ρ_3 et ρ_4 autour du centre O de cette dernière sans que le

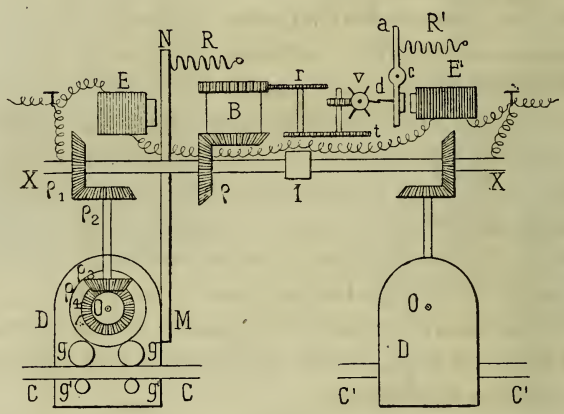


Fig. 314. — Principe du régulateur de Mersanne.

contact cesse entre ρ_3 et ρ_4, sans que le mouvement cesse d'être communiqué régulièrement aux galets.

Il est clair que les charbons seront entraînés, s'avançant l'un vers l'autre, si rien ne s'oppose au mouvement du barillet B; mais par contre ce mouvement d'approche sera arrêté, si à l'aide d'un doigt *d* on vient arrêter le volant à ailettes, puisque, les roues *t* et *r* étant rendues immobiles par là même, le barillet B ne pourra plus tourner. Or ce doigt *d* est porté par un levier *ac* mobile autour du point *c* devant un électro-aimant E' qui est monté en dérivation sur le circuit de la lampe; un ressort R' éloigne le levier de l'électro-aimant et met en prise le doigt *d* avec le volant à ailettes arrêtant ainsi tout mouvement; lorsque, au contraire, l'électro-aimant venant à vaincre l'action du ressort R' attirera le levier, le doigt *d* se reti-

rant, le volant *v* sera dégagé, le rouage pourra tourner et par suite les charbons se rapprocheront.

Le mécanisme qui produit l'allumage est distinct du précédent; il comprend un second électro-aimant E qui est dans la même dérivation que E′ et devant lequel se trouve un fer doux porté par un levier qui est fixé en M à la boîte D′ qui contient les galets; un ressort R éloigne ce levier de l'électro-aimant, il est beaucoup plus puissant que le ressort R′ et ne peut être vaincu par l'action de

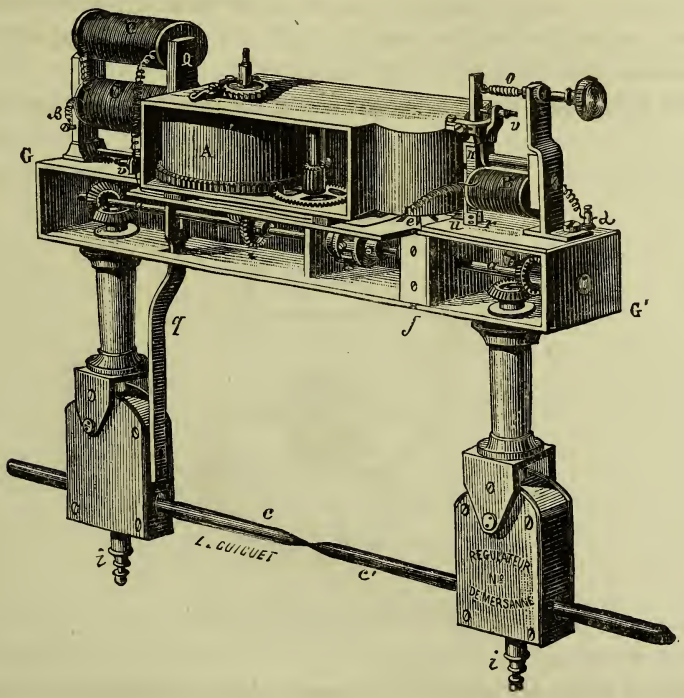


Fig. 315. — Régulateur de Mersanne. (*La Lumière électrique.*)

l'électro-aimant que si celui-ci est traversé par la presque totalité du courant.

Voyons maintenant comment fonctionne le régulateur au repos, les charbons étant écartés. Lorsqu'on fait passer le courant, il commence par traverser dans sa totalité les électro-aimants E et E′. Par suite de l'action de E′ les roues peuvent tourner, les charbons se déplacent; par suite de l'action de E le levier MN basculant entraîne la boîte D et le charbon C; au bout d'un instant, il y a contact entre les deux charbons, le courant s'établit principalement par cette voie

et devient très faible dans les électro-aimants qui constituent un circuit dérivé très résistant; ceux-ci cessent d'agir, le mouvement des roues et des charbons s'arrête, d'une part, tandis que, d'autre part, le ressort R ramène en place le levier MN et la boîte D écartant ainsi le charbon C du charbon C′ et constituant l'arc. Lorsque par suite de l'usure des charbons, la résistance de l'arc augmentera, l'intensité du courant dérivé croîtra, l'électro-aimant agira, permettant le rapprochement progressif des charbons jusqu'à ce qu'ils aient repris leur distance normale, mais ce courant, qui n'est qu'une fraction totale, ne sera jamais assez puissant pour que l'électro-aimant E puisse vaincre l'action du ressort R et par suite pour qu'il y ait mouvement du levier MN et de la boîte D.

Pour éviter que les bobines ne soient détériorées dans les cas où

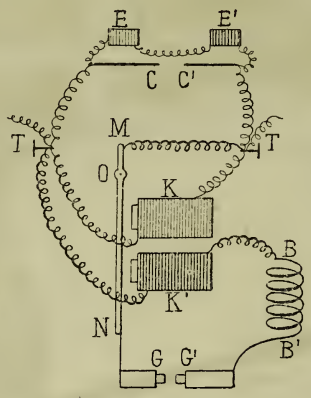


Fig. 316. — Boîte de sûreté Mersanne.

le courant viendrait à cesser de passer dans les charbons, on peut joindre à chaque lampe une boîte de sûreté dont voici la disposition générale (fig. 316).

Un levier MON tourne autour du point O devant deux bobines l'une à fil fin K, montée en dérivation entre les bobines TT′ entre lesquelles est installée la lampe EE′CC′, l'autre à gros fil K′. Celle-ci est reliée d'une part à la borne T, de l'autre à une résistance BB′ égale à la résistance de l'arc : cette résistance communique d'autre part à un bloc de graphite G′ en face duquel s'en trouve un autre G, monté sur le levier MON dont l'extrémité M est relié à la borne T′.

Lorsque la lampe s'éteint, le courant augmente d'intensité dans la

bobine K, le levier est attiré, les blocs GG′ entrent en contact et le courant traverse un circuit T′MNGG′B′BK′T équivalent à celui de la lampe même, ce qui évite la détérioration des bobines de dérivation. En même temps l'action de la bobine K′ s'ajoute à celle de K pour maintenir les blocs de graphite au contact.

447. Régulateurs différentiels. — Les régulateurs différentiels sont pour ainsi dire une combinaison des deux systèmes précédents ils présentent deux bobines ou électro-aimants ; l'une des bobines est traversée par le courant principal qui forme l'arc, l'autre par un courant dérivé plus faible passant dans un circuit qui aboutit de part et d'autre de l'arc ; les deux bobines sont disposées de manière à agir en sens inverse sur le mécanisme du régulateur. Voici comment, schématiquement, on peut concevoir la disposition et le fonctionnement de ces appareils différentiels (fig. 317) :

C_1 et C_2 sont des charbons, C_2 étant fixe, par exemple, C_1 est porté

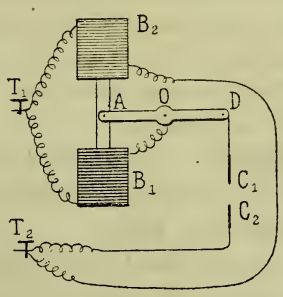


Fig. 317. — Principe des régulateurs différentiels.

sur une tige suspendue à un levier D O A mobile autour du point O ; son extrémité A est reliée à une tige de fer doux verticale dont les extrémités pénètrent à l'intérieur de deux bobines B_1 et B_2. La bobine B_1 est une bobine à gros fil qui reçoit le courant principal par un fil partant de T_1 et aboutissant à O, le courant suivant ensuite le chemin $ODC_1C_2T_2$; la bobine B_2 est une bobine à fil fin qui constitue une dérivation dont les extrémités sont, par exemple en T_1 et T_2. Lorsque l'appareil fonctionne avec la distance normale des charbons, les actions opposées des deux bobines sur le fer doux A sont égales, bien que le courant qui traverse B_2 soit beaucoup plus faible que celui qui traverse B_1, parce que cette dernière contient un bien plus grand nombre de spires que B_2.

On voit que si, par suite de l'usure, la distance entre les charbons C_1 et C_2 vient à augmenter, ce qui fait croître la résistance du circuit

principal et diminue par suite l'action de la bobine B_1, le courant dérivé deviendra au contraire plus intense et l'action de la bobine B_2 se trouvera accrue; sous l'influence de ces deux variations opposées, le fer doux tendra à être soulevée et par suite les charbons se rapprocheront jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli.

Dans ce cas, l'effet ne dépend que du rapport entre le courant principal et le courant dérivé; il ne se manifestera donc rien si ce rapport restant le même, c'est-à-dire la grandeur de l'arc ne changeant pas, l'intensité du courant qui arrive en T_1 vient à changer; c'est-à-dire que le régulateur ne fonctionne pas, malgré les variations du courant extérieur, qu'il n'agira que s'il survient un changement dans la seule résistance variable, celle de l'arc. On pourra donc mettre plusieurs lampes en séries sans que les variations qui se produisent dans l'une puissent affecter les autres. Bien entendu, il faut éviter qu'une lampe ne s'éteigne parce que le courant ne pouvant passer dans cette lampe qu'à travers la dérivation qui est très résistante, sera très affaibli dans tout le circuit, de plus il pourrait détériorer la bobine B_2, rompre le fil, le courant cesserait alors de passer et toutes les lampes s'éteindraient. Il est convenable de prendre des précautions pour éviter cet accident.

448. Régulateur Siemens. — Il existe un modèle de régulateur Siemens basé sur le principe du système différentiel; voici sommairement en quoi il consiste (fig. 318) :

Le charbon C_2 par exemple étant fixe, le charbon C_1 est suspendu à une tige verticale pesante AA munie d'une crémaillère; celle-ci engrène avec une roue dentée *r*, elle pourra descendre si cette roue est libre de tourner, les deux charbons se rapprocheront alors; si la roue est empêchée de tourner, la crémaillère suivra les mouvements de la roue qui, comme nous allons le dire, est portée par un cadre mobile; si donc la roue est entraînée de bas en haut, la tige AA montera et les charbons s'écarteront.

D'autre part, on a les deux bobines B et B′ comme dans la figure schématique; à l'intérieur de ces bobines se meut une tige de fer doux DD dont la position d'équilibre et le mouvement dépendent des attractions exercées par B et B′, attractions qui elles-mêmes sont déterminées par la résistance de l'arc C_1C_2. Cette tige entraîne le levier FG, qui oscille autour du point H et fait partie d'un parallélogramme articulé GHG′H′ dont H et H′ sont les points fixes. La tige verticale GG′ supporte d'une part une traverse I sur laquelle repose l'axe de la roue *r*, et d'autre part le levier *mn* mobile autour du point *m*.

Sur l'axe de la roue dentée et reliée à celle-ci se trouve une roue à dents, analogue aux roues d'échappement des horloges à ancre; comme dans ces horloges cette roue est sous la dépendance d'une ancre portée par un petit pendule *pq* mobile autour du point *o;* la rotation de la roue ne peut avoir lieu que si le pendule est suscep-

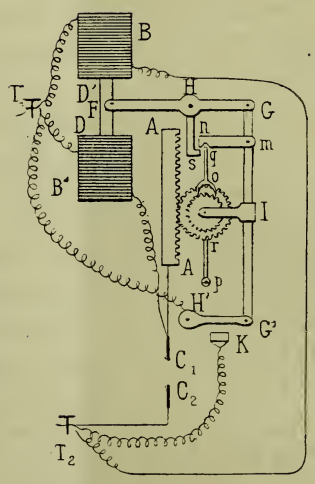


Fig. 318. — Principe du régulateur Siemens.

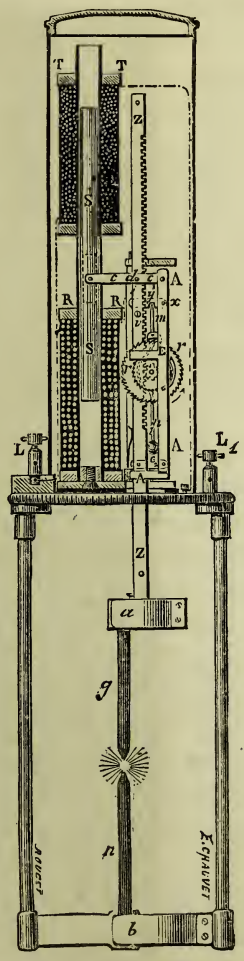


Fig. 319. — Régulateur Siemens.

tible d'osciller, elle ne peut se produire si les oscillations du pendule sont empêchées. La tige du pendule se prolonge au-dessus du point de suspension *o* par une partie *q* dont l'extrémité vient se placer dans une entaille qui existe au-dessus du levier *mn* et dont nous expliquons le rôle plus loin.

La marche du courant se comprend aisément; arrivé en T_1 il se divise en deux; d'un côté il passe dans la bobine à fil fin B et de là se rend directement à la borne de sortie T_2; de l'autre, il passe dans une bobine à gros fil B', se rend au charbon C_1, produit l'arc

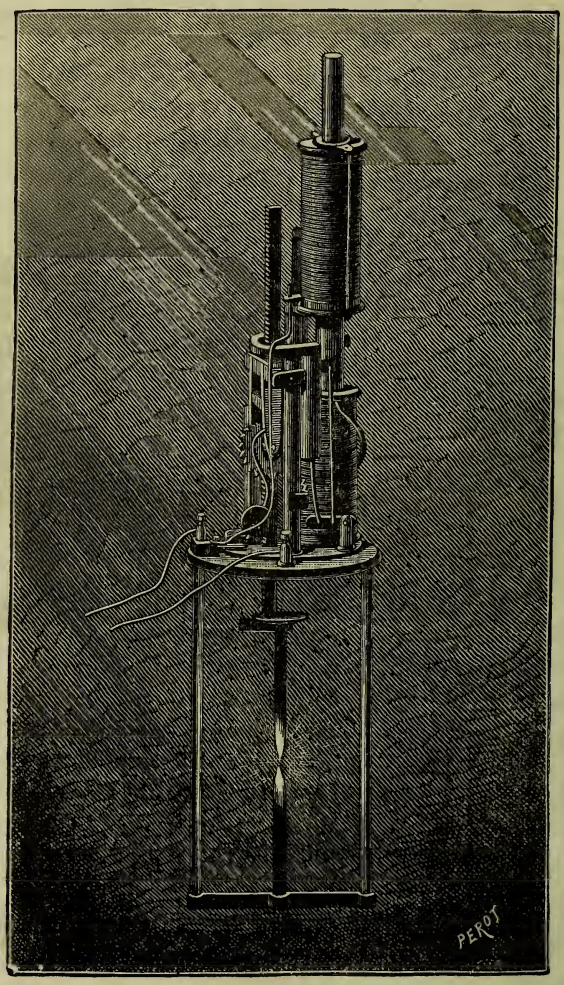


Fig. 320. — Régulateur Siemens. (*La Lumière électrique.*)

et va se terminer en T_2. Ajoutons que la borne T_1 est reliée à l'axe de rotation H'; à une petite distance au-dessous de la tige G'H', se trouve un contact K qui est relié directement à la borne T_2.

Il est facile alors de se rendre compte de l'action de ce régula-

teur : au début les deux charbons sont en contact ; lorsque l'on ferme le circuit le courant qui passe par B′ et par les charbons au contact a une grande intensité et la tige DD est vivement attirée vers le bas entraînant le levier FG et la tige verticale GG′ qui s'élève. Dans ce mouvement l'extrémité *q* du pendule vient se loger dans l'entaille *n*, le pendule ne peut osciller. L'immobilité qui en résulte pour la roue *r* rend solidaires la tige AA et la tige GG′ ; la tige AA est donc soulevée et avec elle le charbon C_1, l'arc est formé.

Lorsque par l'usure des charbons, la résistance de l'arc augmentant, le courant qui traverse B′ s'affaiblit, la tige DD va être attirée vers le haut par B ; la tige GG′ descendra donc ; dans ce mouvement est entraînée la traverse *mn* qui pour une certaine position rencontre par son extrémité libre un index fixe *s;* elle s'incline, dégage le pendule et rend possible son mouvement qui se produit sous l'influence de la crémaillère qui descend par son propre poids ; les charbons se rapprochent donc ; mais alors la tige DD, plus attirée par B′, revient à sa position d'équilibre ; la tige AA remonte, la traverse *mn* cesse de reposer sur l'index *s* et vient arrêter le mouvement du pendule, ce qui suspend la descente du charbon C_1.

Si l'un des charbons vient à casser ou si l'un d'eux est usé complètement, il est à craindre que le courant augmentant d'intensité dans B ne puisse détériorer cette bobine. Voici comment ce danger est évité : le courant, dans ces conditions, augmente rapidement en B ce qui a pour effet d'incliner beaucoup le levier FG et amène un abaissement notable du point G′ et de la traverse inférieure G′H′ qui vient alors buter contre le contact métallique K, ce qui établit un court circuit $T_1H'KT_2$. La lampe est supprimée du circuit ; pendant ce temps, la tige AA descend et le contact des charbons peut se rétablir, l'appareil recommence à fonctionner comme au début ; si le charbon est usé, la tige AA est arrivée à fond de course et le *court-circuit* subsiste jusqu'à ce qu'on ait remplacé les charbons.

449. Régulateur Brush. — Dans le régulateur Brush on retrouve une forme spéciale du système différentiel dont nous indiquerons le principe.

La pièce principale est une double bobine HH′ (fig. 321), sur laquelle sont enroulés en sens contraire deux fils : un fil gros et faisant un petit nombre de spires et dans lequel passe le courant qui se rend aux charbons pour former l'arc, et un fil fin faisant un grand nombre de spires et monté en dérivation sur l'arc. Deux tiges de fer doux N,S pénètrent dans les bobines et s'y enfoncent plus ou moins suivant

l'action des courants; une bague W est placée autour du charbon supérieur sur lequel elle glisse librement, elle entre, en un point de sa périphérie dans une entaille horizontale C existant sur une pièce reliée plus ou moins directement aux tiges de fer doux.

Au début, les charbons sont au contact; quand le courant passe, il présente une grande intensité dans le gros fil qui fait partie d'un circuit de peu de résistance et dont l'action l'emporte sur celle du courant qui passe dans le fil de dérivation (non représenté sur la figure) dont la résistance est au moins cent fois plus grande. Sous l'influence de l'action exercée par le gros fil, le fer doux est attiré dans la bobine et soulève la pièce qui entraîne la bague; mais celle-ci, saisie en un point seulement se place obliquement, et coinçant

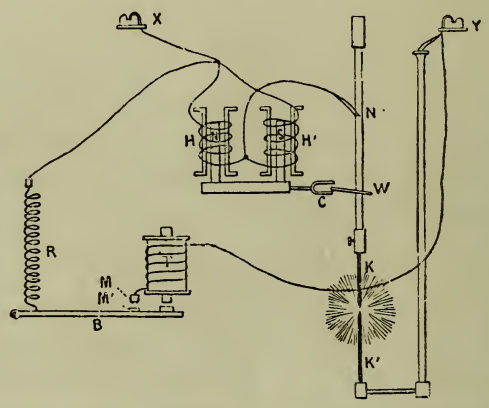


Fig. 321. — Principe du régulateur Brush. (*La Lumière électrique.*)

contre le charbon, l'entraîne dans son mouvement ascendant : l'arc est formé.

Lorsque par l'usure du charbon la résistance de l'arc s'accroît, l'intensité du courant diminue dans le gros fil et par contre nécessairement s'accroît dans le fil fin; l'effet d'attraction sur le fer doux diminue donc et celui-ci descend, la bague moins inclinée laisse glisser le charbon; les variations de courant se produisent alors en sens inverse, la tige de fer doux remonte un peu, la bague s'incline, le coïncement se produit et le charbon s'arrête. On a donc, on le voit, un moyen de régulation très simple.

L'appareil présente quelques dispositions de détail qui le rendent d'un emploi commode; c'est ainsi que l'extrémité supérieure du porte-charbon mobile porte un petit piston se déplaçant dans un

tube rempli de glycérine pour adoucir les mouvements en évitant les à-coup.

D'autre part chaque lampe présente un appareil de sûreté pour mettre l'appareil hors circuit quand les charbons, étant cassés, l'arc ne peut se rétablir; ce résultat est atteint par l'action d'un électro-aimant T (fig. 321) sur lequel passe un fil de dérivation; l'intensité y devient très grande quand le courant cesse de passer dans le fil principal; cet électro-aimant attire alors un levier B malgré l'action d'un ressort antagoniste et ce levier établit la communication qui forme le *court-circuit*.

Enfin disons que, en général, les lampes présentent deux paires

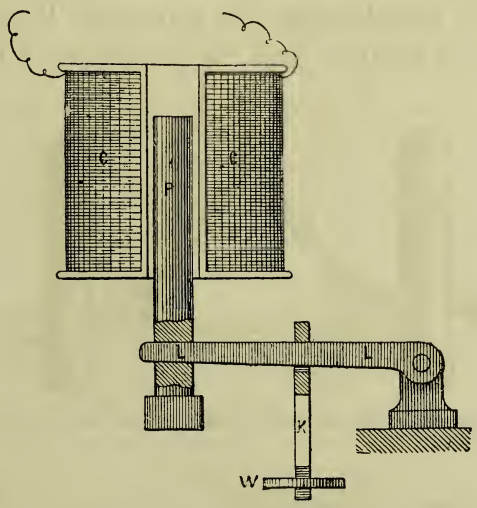


Fig. 322. — Bobine du régulateur Brush. (*La Lumière électrique.*)

de charbon qui, par une ingénieuse disposition, entrent en jeu successivement, de telle sorte que l'appareil peut fonctionner pendant un assez long temps. Les deux charbons R_1R_2 (fig. 323) sont placés parallèlement et la tige mobile entraîne une traverse horizontale aux deux extrémités de laquelle se trouvent les mâchoires dans lesquelles passent les bagues W_1W_2; mais ces mâchoires ne sont pas au même niveau; l'une des bagues est donc saisie avant l'autre et entraîne plus tôt le charbon correspondant, de telle sorte que c'est l'autre charbon qui donne naissance à l'arc jusqu'à ce qu'il soit usé; à ce moment, l'arc s'allonge, la résistance augmente, le régulateur entre en jeu; le second charbon descend alors, rétablit la distance normale et l'arc se produit.

450. — Les lampes à arc peuvent présenter les intensités lumineuses les plus variables depuis 40 carcels environ jusqu'à 5000 carcels et même plus; ces différences sont obtenues en faisant varier la section des charbons et l'intensité du courant. La différence de potentiel à l'arc ne varie pas beaucoup et est de 40 à 50 volts. Le nombre de carcels correspondant à un travail mécanique donné dépend, bien entendu, non seulement de la lampe, mais aussi de la machine productrice des courants. On peut cependant admettre comme moyenne 50 à 60 carcels par cheval mécanique.

Le prix de l'éclairage par arc voltaïque dépend naturellement des conditions d'installation et, d'une manière générale, est d'autant moindre que la quantité de lumière fournie doit être plus grande.

Les intensités considérables que fournissent les lampes à arc montrent que ces appareils sont surtout destinés à l'éclairage de

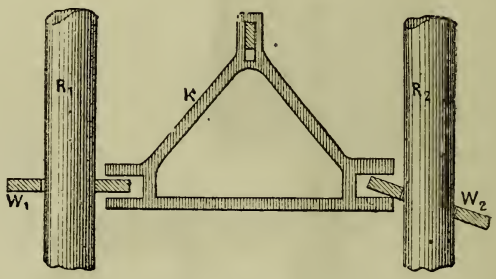


Fig. 323. — Disposition pour les lampes à deux charbons. (*La Lumière électrique.*)

grands espaces, vastes salles, jardins, rues, places ; ils sont particulièrement utiles pour certains cas où une très vive lumière est nécessaire dans une direction déterminée, comme il arrive pour les *projecteurs* employés par l'armée et par la marine, pour les phares. Malgré une certaine opposition qui s'est manifestée, il semble que les phares électriques doivent être adoptés pour tous les feux de premier ordre et des expériences récentes faites en Angleterre ont montré leur supériorité sur les autres systèmes.

Nous n'avons pas à insister sur ces appareils qui peuvent, à divers points de vue, avoir des dispositions très variables, mais pour lesquels nous n'avons rien à ajouter.

Les avantages hygiéniques des lampes à arc sur l'éclairage au gaz sont incontestables et sont analogues à ceux que nous avons indiqués pour les lampes à incandescence, de telle sorte que leur emploi peut être recommandé pour l'éclairage des salles, afin

d'éviter la production d'acide carbonique et de vapeur d'eau, et le dégagement de chaleur. Mais il faut reconnaître que la lumière a souvent une teinte qui est peu agréable et que son éclat est fatigant pour la vue; aussi dans ce cas convient-il de ne jamais laisser l'arc à nu, mais d'entourer la lampe d'un globe dépoli qui augmente l'étendue de la partie éclairante et diminue l'intensité intrinsèque de la lumière; ce qui rend l'effet sur l'œil moins déplaisant et donne des ombres moins dures.

Une bonne disposition dans le cas de salles de moyenne dimension consiste à masquer la lampe par un réflecteur qui envoie la lumière sur un plafond diffusif; on obtient ainsi un éclairement doux, fort agréable.

415. Comparaison des systèmes de régulateurs. — Il n'est pas sans intérêt de rechercher approximativement au moins quelles sont les forces qui agissent dans les divers systèmes de régulation et de quoi dépendent leurs variations; nous admettrons que, dans tous les cas, les bobines ou électro-aimants sont employés de la même façon et nous admettrons comme suffisamment exact que la force émanée d'un électro-aimant dans les conditions de l'expérience est proportionnelle au nombre de tours de spires n et à l'intensité I du courant.

Appelons a la résistance de l'arc que l'on veut maintenir ; soient r la résistance de la bobine, R la résistance de tout le reste du circuit en dehors de la lampe considérée et enfin E la force électromotrice du générateur de courant.

1° Dans le système à variation d'intensité, la force émanée de l'électro-aimant f est donnée par la relation

$$f = \mathrm{K}n\mathrm{I}$$

dans laquelle on a :

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R} + a + r}$$

ce qui donne :

$$f = \mathrm{K}\,\frac{n\mathrm{E}}{\mathrm{R} + a + r}$$

Dans ce cas, r est petit, car il faut éviter d'affaiblir le courant par des résistances inutiles.

On voit immédiatement que la valeur de f dépend de la même façon de R et de a. Pour que f ait une valeur constante (correspondante à la tension du ressort antagoniste) il faut et il suffit que

$R + a$ reste constant, quelles que soient les variations individuelles de R et de a.

Étudions les variations de la force, pour des variations Δa et ΔR que nous supposerons très petites, on a en appelant respectivement Δf et δf les variations correspondantes de la force

$$\Delta f = -K \frac{nE\Delta a}{(R + a + r)^2}$$

et

$$\delta f = -K \frac{nE\Delta R}{(R + a + r)^2}$$

les variations de l'arc et celles du circuit extérieur modifient la force de la même façon.

Considérons en particulier le cas où il y a p lampes dans le circuit; négligeons les conducteurs intermédiaires, on aura alors

$$R = (p - 1)\, a$$

et les formules précédentes deviendront :

$$\Delta f = -K \frac{nE\Delta a}{(pa + r)^2}$$

et

$$\delta f = -K \frac{nE\Delta R}{(pa + r)^2}$$

Δa représente la variation de la résistance de la lampe considérée; ΔR celle d'une autre lampe du circuit; on voit que leur influence est la même.

2° Considérons le système à dérivation et soient les mêmes notations; soit de plus i l'intensité du courant qui circule dans la bobine de dérivation dont la résistance est grande.

On a toujours :

$$f = Kni$$

Il faut déterminer i; on a rapidement, d'après les formules connues (121, note) :

$$I = \frac{E(a + r)}{Ra + Rr + ar}$$

et

$$\frac{i}{I} = \frac{a}{a + r}$$

Il vient donc :

$$f = \mathrm{K}\,\frac{n\mathrm{E}a}{\mathrm{R}a + \mathrm{R}r + ar}$$

Étudions comme précédemment et dans les mêmes conditions les variations de la force; nous aurons :

$$\Delta f = \mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{\mathrm{R}r\Delta a}{(\mathrm{R}a + \mathrm{R}r + ar)^2}$$

et

$$\delta f = -\,\mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{a\,(a + r)\,\Delta\mathrm{R}}{(\mathrm{R}a + \mathrm{R}r + ar)^2}$$

On voit d'abord que quand a varie la variation de la force est de signe contraire à ce qu'elle était dans le cas précedent; c'est ce que nous avons déjà indiqué. Supposons comme précédemment que $\mathrm{R} = (p - 1)a$ en négligeant les conducteurs et dérivations accessoires. Il vient alors toutes réductions faites :

$$\Delta f = \mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{(p - 1)\,r\Delta a}{a\,[pr + (p - 1)\,a]^2}$$

et

$$\delta f = -\,\mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{(a + r)\,\Delta\mathrm{R}}{[pr + (p - 1)\,a]^2}$$

valeurs que nous pouvons écrire :

$$\Delta f = \mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{(p - 1)\,\Delta a}{ar\left(p + (p - 1)\,\frac{a}{r}\right)^2}$$

et

$$\delta f = -\,\mathrm{K}n\mathrm{E}\,\frac{\left(1 + \frac{a}{r}\right)\Delta\mathrm{R}}{ar\left(p + (p - 1)\,\frac{a}{ar}\right)^2}$$

On voit que δf sera plus petit que Δf c'est-à-dire que les variations des lampes extérieures auront moins d'influence sur un régulateur que celles de sa lampe même lorsque l'on aura : $p - 1 > 1 + \frac{a}{r}$; comme $\frac{a}{r}$ est une fraction, ce cas se présentera lorsque p sera égal ou supérieur à 3. On voit même que $\frac{a}{r}$ étant petit et r très grand,

la valeur de δf sera toujours très petite c'est-à-dire que l'action des variations d'une lampe extérieure sera absolument très faible; elle sera même d'autant plus faible qu'il y aura un plus grand nombre de lampes dans le circuit; la valeur de Δf décroîtra également quand p augmentera, mais bien moins rapidement.

3° Enfin, considérons le cas des lampes différentielles. Dans ce cas outre les données précédentes, il y a à tenir compte de l'électro-aimant placé sur le circuit de l'arc : soit n' le nombre de spires qu'il présente et soit i' l'intensité du courant qui le traverse. Les deux électro-aimants agissant en sens contraire la force qui résulte de leur action simultanée est de la forme

$$f = \mathrm{K}\,(ni - n'i')$$

et l'on a pour les valeurs de i, et de i' :

$$i = \frac{\mathrm{E}a}{\mathrm{R}a + ra + \mathrm{R}r}.$$

et

$$i' = \frac{\mathrm{E}r}{\mathrm{R}a + ar + \mathrm{R}r}$$

On aura donc :

$$f = \mathrm{KE}\,\frac{na - n'r}{\mathrm{R}a + ra + \mathrm{R}r}$$

Pour qu'il y ait équilibre, il faut et il suffit que l'on ait :

$$na = n'r$$

ou

$$\frac{n}{n'} = \frac{r}{a},$$

condition facile à réaliser dans la construction des électro-aimants, quand elle est remplie, l'équilibre existe quel que soit R, quelles que soient par conséquent les variations du reste du circuit. Le réglage de la lampe considéré est absolument indépendant des autres lampes.

Étudions la variation de la force f quand a variera, on en a général :

$$\Delta f = \mathrm{KE}\,\frac{[(na - n'r)\,(\mathrm{R} + r) - n\,(\mathrm{R}a + ra + \mathrm{R}r)]\,\Delta a}{(\mathrm{R}a + ra + \mathrm{R}r)^2}$$

Il est surtout intéressant de connaître cette variation à partir de la position d'équilibre; comme pour celle-ci on a

$$na = n'r$$

la valeur de Δf simplifie et se réduit à :

$$\Delta f = - \text{KE} \frac{n\Delta a}{\text{R}\ (a + ra + \text{R}r)}$$

et en supposant qu'il y ait p lampes en circuit, on a :

$$\Delta f = - \text{KE} \frac{n\Delta a}{a\ (pr + (p - 1)\ a)}$$

Cette valeur est plus grande que celle que l'on a trouvée pour les lampes en dérivation et qui peut s'écrire :

$$\Delta f = - \text{KE} \frac{n\Delta a}{a\ [pr + (p - 1)\ a] \left(\frac{p}{p - 1} + \frac{a}{r}\right)}$$

Le facteur $\frac{p}{p-1} + \frac{a}{r}$ étant toujours plus grand que 1, on voit que cette dernière valeur de Δf est plus petite que la précédente; les régulateurs différentiels sont donc plus sensibles que les régulateurs à dérivation.

452. Bougies électriques Jablochkoff. — Nous avons dit l'influence qu'avait exercée sur le développement de la lumière électrique la découverte de la bougie Jablochkoff, bougie donnant la lumière à arc sans régulateur; l'idée parut féconde et plusieurs solutions furent données de ce problème : nous allons indiquer les principales en commençant par la bougie Jablochkoff.

L'usure des charbons fait varier la longueur de l'arc dans les lampes que nous avons précédemment décrites parce que les charbons sont placés sur le prolongement l'un de l'autre; il n'en est plus ainsi, si, comme l'a fait M. Jablochkoff, on place ces charbons *parallèlement*, si l'usure se fait également, et si l'on a soin d'assurer la situation de l'arc au sommet des charbons. Pour satisfaire à cette dernière condition, M. Jablochkoff constitue la bougie qui porte son nom par deux charbons aussi semblables que possible qu'il place parallèlement et entre lesquels il coule une couche de manière isolante, le *colombin*, qui est maintenant un mélange de plâtre et de sulfate de baryte. Les charbons sont amincis à une

extrémité et on recouvre cette extrémité par une pâte chabonneuse qui se solidifie.

Pour se servir de la bougie on met les autres extrémité, des charbons en communication avec les fils aboutissant à une machine à courants alternatifs; le courant s'établit, brûle l'amorce charbonneuse et l'arc se produit entre les pointes des charbons qu'il ne peut quitter par suite de la présence du colombin. Les pointes s'usent par la combustion, mais le colombin se désagrège peu à peu par l'action de la haute température et disparaît en même temps que les charbons. Le colombin présente un autre avantage; si le courant cesse de passer, l'extrémité de la masse isolante reste rouge

Fig. 324. — Bougie Jablochkoff.

pendant quelques instants et si le courant reprend après un temps qui n'excède pas 2 secondes, l'arc se rétablit de nouveau.

On conçoit aisément que l'emploi des courants alternatifs a pour effet de provoquer l'usure égale des deux charbons.

450. — Il n'est pas difficile de concevoir une pince destinée à recevoir la bougie et à la mettre en communication avec la machine; mais en réalité, il faut employer une disposition spéciale. On ne peut, en effet, donner une grande longueur aux bougies : elles ne dépassent pas 25 centimètres et leur combustion peut durer deux heures. Comme on ne peut songer à les remplacer lorsqu'elles sont usées, on les dispose par groupes sur un même support de manière qu'elles brûlent successivement. Chaque bougie est pincée à sa base entre deux pièces métalliques, une fixe et une à ressort communiquant aux fils de la machine (fig. 325 et 326); lorsque dans une bougie, la

combustion a usé la totalité des charbons, on fait passer le courant dans une bougie voisine à l'aide d'un commutateur mû à la main. On a proposé l'emploi d'appareils automatiques mis en action par des

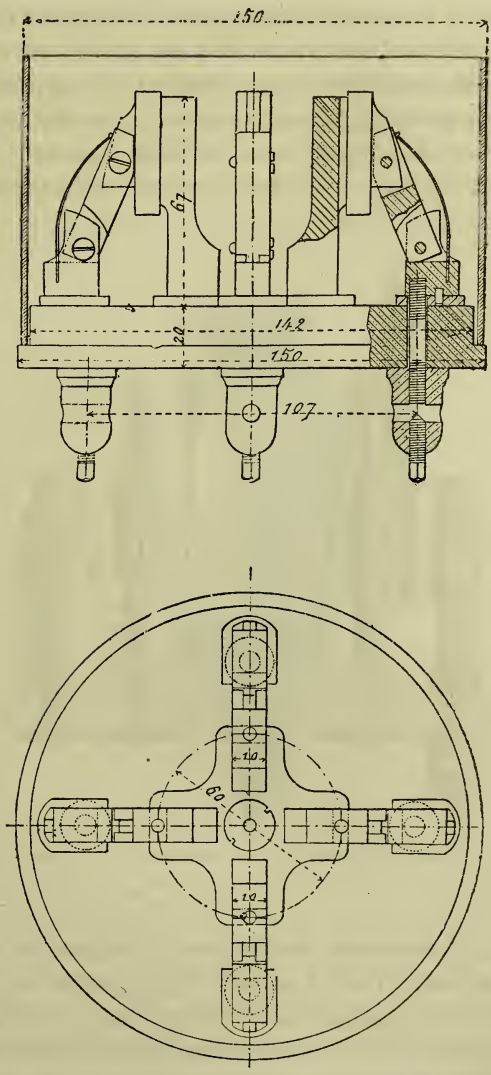


Fig. 325 et 326. — Chandelier pour quatre bougies Jablochkoff.

pièces métalliques placées dans le voisinage de la base de la bougie et qui se dilatent lorsque l'arc parvient à leur hauteur. M. Gadot a imaginé un commutateur automatique mû par l'action d'un électro-

aimant placé en dérivation, et qui devient assez puissant, lorsque la bougie arrive à sa fin et que l'arc va s'éteindre, pour agir sur un arbre portant des palettes métalliques isolées placées en hélice et pouvant plonger dans un godet rempli de mercure ; chaque ailette correspond à une bougie et la rotation de l'arbre par l'action de l'électro-aimant substitue une palette à une autre. On a pu, grâce à cet appareil, faire un service de dix-huit heures sans toucher aux appareils.

Une autre disposition plus simple est représentée figure 327 : le plateau *p* qui sert de support au chandelier est isolant ; les branches extérieures *e* des pinces sont montées sur un cercle métallique *m* relié

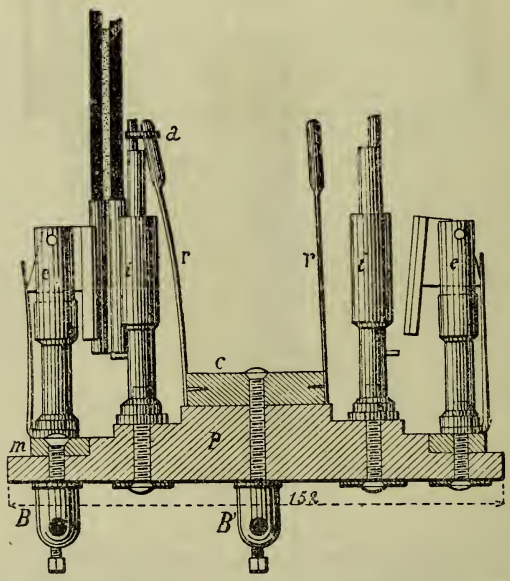


Fig. 327. — Chandelier à commutation automatique pour bougies Jablochkoff.

à la borne B ; les branches intérieures *i* sont isolées. Au centre est un cercle métallique *c* relié à la borne B′ et portant des ressorts *r* en nombre égal à celui des pinces. Quand on met les bougies en place on fixe les extrémités de ces ressorts aux branches intérieures à l'aide d'un petit anneau de plomb *a*. Quand le circuit est fermé, le courant s'établit à travers la bougie dont l'amorce a la moindre résistance, l'arc se produit ; lorsque cette bougie est presque entièrement consumée, l'anneau *a* correspondant fond, le circuit est rompu, le courant passe à une autre bougie, et ainsi de suite.

Les bougies sont placées généralement dans un globe de verre

dépoli qui substitue une large surface lumineuse au point lumineux formé par l'arc (fig. 328).

Une bougie Jablochkoff exige pour fonctionner normalement un courant de 8 à 9 ampères et une différence de potentiel de 40 volts; les charbons rougissent dans toute longueur si l'intensité atteint 11 ampères, l'arc s'éteint si elle descend à 5 ampères.

On peut évaluer à 30 carcels environ l'intensité lumineuse de la lumière fournie par la bougie Jablochkoff (les globes enlèvent 30 à 40 p. 100 de cette lumière) et il faut 1 cheval-vapeur environ pour une bougie.

La bougie Jablochkoff n'est pas sans inconvénient, l'extinction est

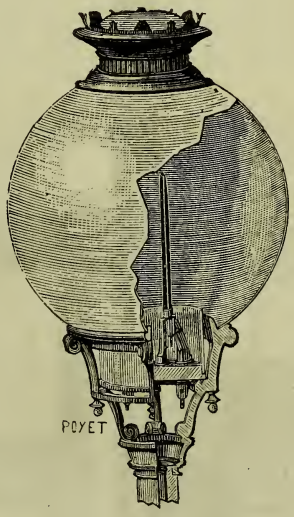


Fig. 328. — Chandelier Jablochkoff avec son globe.

rare, mais elle se produit quelquefois et il n'y a pas de rallumage automatique; ce qui lui manque le plus, c'est la fixité, elle varie brusquement d'intensité et de coloration; ajoutons enfin qu'elle produit un bruit peu agréable, sifflement ou ronflement dû à l'emploi des courants alternatifs.

Mais on ne saurait méconnaître que ses avantages sont réels et que, outre le mérite d'avoir lancé la question de l'éclairage électrique, elle donne une solution satisfaisante toutes les fois qu'il s'agit d'éclairer de grands espaces.

454. Bougies électriques Wilde. — Divers systèmes ont été imaginés qui ont mis en application l'idée que M. Jablochkoff avait eue

de placer parallèlement les deux charbons. Nous citerons seulement la bougie Wilde dans laquelle le colombin a disparu et dans laquelle le rallumage se fait automatiquement lorsqu'il y a eu extinction.

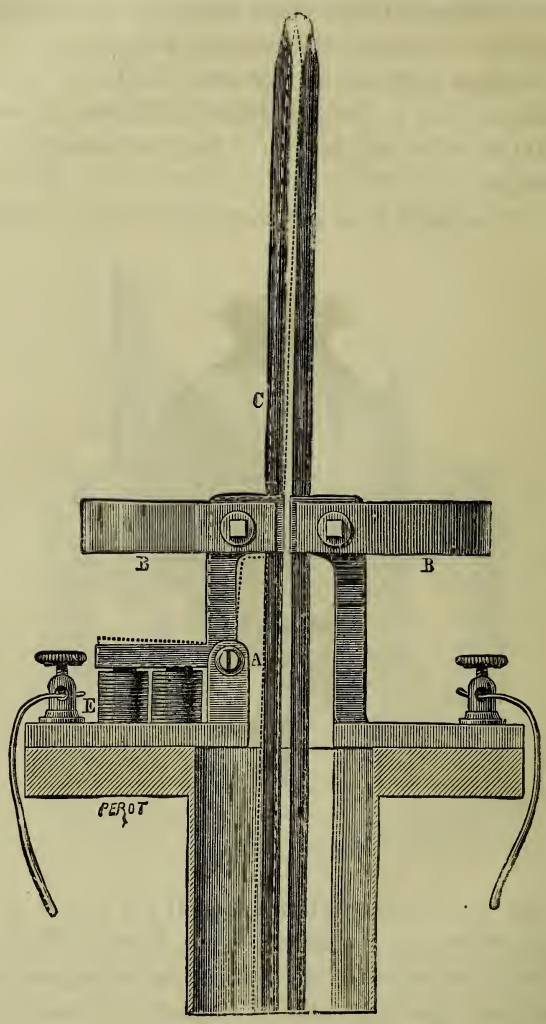


Fig. 329. — Bougie électrique Wilde. (*La Lumière électrique.*)

Les charbons sont placés dans des pinces (fig. 329) dont l'une est fixe et dont l'autre peut tourner légèrement sous l'action d'un ressort. A l'état de repos, l'action de ce ressort fait basculer la pince mobile et l'incline jusqu'à ce que le charbon qu'elle porte vienne toucher le

charbon fixe par son extrémité supérieure. La pince mobile est liée à une pièce de fer doux qui est située au-dessus d'un électro-aimant E traversé par le courant qui se rend au charbon. Dès que le circuit est fermé et que le courant s'est établi à travers les charbons en contact, l'électro-aimant agit, fait basculer la pince qui entraîne le charbon mobile et l'écarte du charbon fixe, produisant l'arc; l'écart subsiste d'ailleurs puisque l'électro-aimant reste en action pendant le passage du courant; si, par une cause quelconque, il y a extinction, l'électro-aimant cesse d'agir, le ressort produit le mouvement de bascule inverse, les charbons se rapprochent et l'appareil est prêt à se rallumer de nouveau lorsque le courant passera.

Malgré l'absence de colombin l'arc se maintient au sommet des charbons pour diverses raisons, notamment parce que les charbons ne sont pas ramenés absolument au parallélisme et que c'est à la partie supérieure que la distance et, par conséquent, la résistance sont le plus faibles.

455. — Lampes a écart invariable. Systèmes Rapieff et Gérard. — M. Rapieff a imaginé une disposition ingénieuse pour obtenir par un liaison matérielle un écart invariable des pointes entre lesquelles jaillit l'arc.

Étant données deux tiges de charbon butant obliquement l'une contre l'autre à leurs extrémités et soumises à des forces qui tendent à les rapprocher, leur point de rencontre restera invariable dans l'espace, soit que ces charbons ne subissent aucune modification, soit qu'ils viennent à s'user. Si donc on a deux systèmes analogues placés à une petite distance et mis en communication avec les bornes d'une machine, lorsque l'arc aura été établi, il subsistera sans changement malgré l'usure provenant de la combustion des charbons.

Dans la lampe de M. Rapieff les deux systèmes angulaires portés chacun par un support spécial qui amène le courant sont l'un et l'autre dans des plans verticaux, ces plans étant perpendiculaires l'un à l'autre. Les charbons sont soumis à des forces qui tendent à les rapprocher respectivement du sommet de l'angle auquel ils appartiennent par l'action de fils fixés aux porte-charbons et qui, passant sur des poulies convenablement disposées, sont tendus par des poids.

A l'état de repos, comme lors de leur fonctionnements, les charbons sont écartés à la distance normale : il faut donc avoir recours à une disposition spéciale pour provoquer l'allumage. A cet effet, un électro-aimant très résistant est placé dans le socle en dériva-

tion sur le circuit de l'arc; par l'intermédiaire d'une pièce en fer doux située au-devant il peut agir sur un des supports des charbons, de manière à le faire basculer légèrement. Au début, le cou-

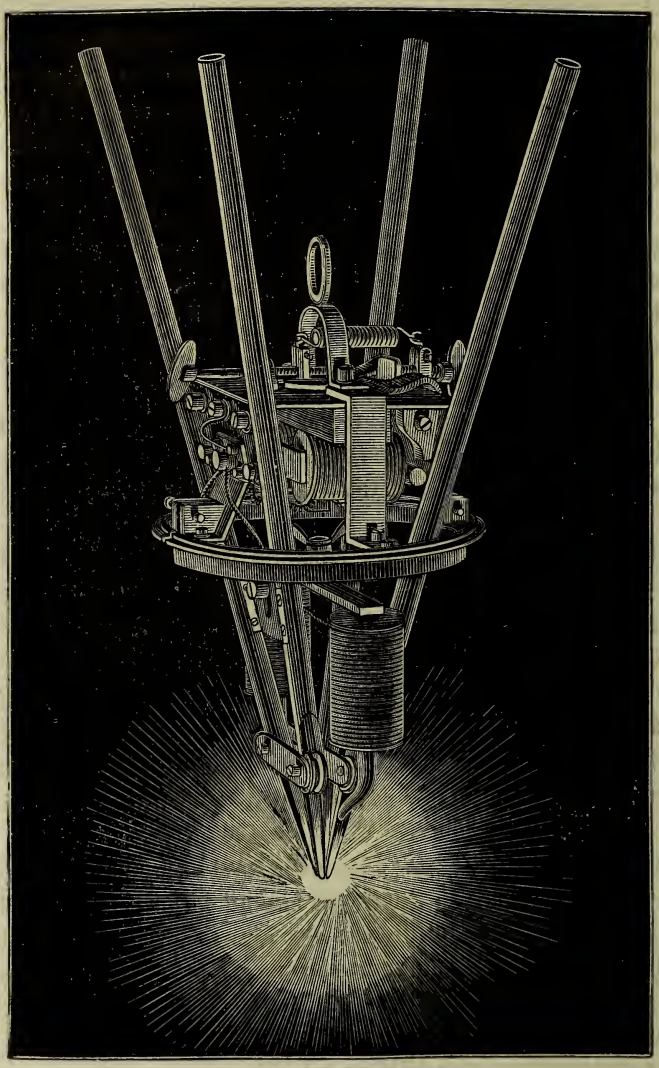


Fig. 330. — Brûleur A. Gérard à écart invariable.

rant passe tout entier dans l'électro-aimant, puisque les charbons ne se touchent pas; celui-ci agit donc et faisant basculer le support rapproche les charbons mobiles des charbons fixes : le courant

s'établit alors entre les charbons, le courant dérivé s'affaiblit, et l'électro-aimant cessant d'être assez puissant, le support sous l'action d'un ressort revient à sa position normale produisant ainsi l'écart nécessaire pour la formation de l'arc. Ce système produit évidemment aussi le rallumage si l'extinction avait lieu.

456. — Le brûleur Gérard (fig. 330) est basé sur un principe analogue, seulement les deux systèmes de couples de charbon sont placés dans des plans inclinés symétriquement disposés par rapport à l'axe de l'appareil; de cette manière l'arc qui constitue comme le sommet d'une sorte de pyramide est dirigé vers la partie inférieure et aucune pièce ne porte ombre sur le sol. Une disposition caractéristique de ce système consiste dans l'adjonction d'un électro-aimant dont les pôles voisins de l'arc, agissant sur lui comme sur un conducteur mobile, le repoussent au point le plus bas possible; cette

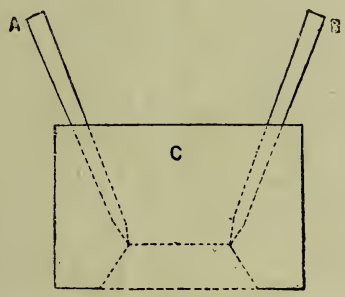


Fig. 331. — Principe de la lampe soleil. (*La Lumière électrique.*)

disposition augmente l'éclairement produit par la lampe, mais produit un bruit désagréable.

Ajoutons sans insister que, dans ces conditions, l'arc agit comme un chalumeau à très haute température et peut être utilisé pour la chaleur considérable qu'il dégage.

457. — Lampe-soleil. — La lampe-soleil, due à MM. Clerc et Bureau, présente l'application, sous une forme qui semble absolument pratique, de faits qui ont été signalés par M. Le Roux en 1868 et dont M. de Baillehache avait tenté une application.

Elle met à profit la haute température développée par l'arc pour échauffer une matière réfractaire, la chaux, qui devient incandescente et par suite éclairante. Comme on l'a dit, c'est la lumière Drummond, produite par l'arc voltaïque.

Elle se compose essentiellement d'un bloc de marbre (fig. 331

et 332) taillé en tronc de pyramide et assujetti entre des fragments de pierre qui le dépassent légèrement du côté de la petite base, de manière à présenter de ce côté une légère cavité. Une boîte de fonte F maintient ces diverses pièces et en fait un bloc compact. Les charbons A, B qui ont la forme d'un cylindre à section semi-circulaire, passent dans des rainures de même forme glissant entre le bloc de marbre et les pierres qui s'y appliquent latéralement; par leur extrémité ces charbons viennent buter contre les pierres en face d'une ouverture qui débouche dans la cavité que nous avons signalée. Si la lampe est placée verticalement, les charbons descendent à fond

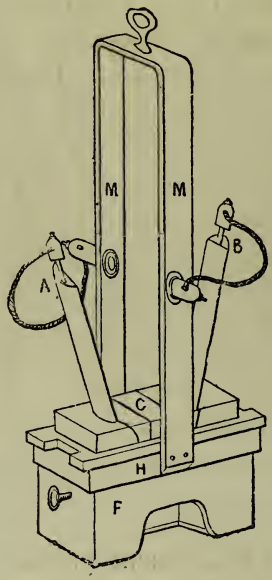


Fig. 332. — Lampe soleil. (*La Lumière électrique.*)

par leur propre poids, pour d'autres positions on arrive à obtenir ce résultat par l'action de ressorts ou de contrepoids agissant sur ces charbons. Enfin, au début, un petit charbon de plombagine réunit les pointes des deux charbons de manière à ce que le courant pourra passer lorsque la lampe sera placée dans un circuit.

Lorsque le courant passe, il brûle promptement le crayon de plombagine et dès lors l'arc se forme, la lampe est allumée. Sous l'influence de la chaleur dégagée, le marbre est d'abord transformé en chaux, puis celle-ci devient incandescente et c'est principalement à son action que l'éclairage est dû. Il importe de remarquer en effet que les pointes des charbons ne sont pas visibles.

La nature de la source lumineuse donne à la lumière de la lampe-soleil une coloration jaune, coloration chaude qui la distingue de la lumière fournie par les lampes à arc; elle contient moins de rayons très réfrangibles que celle-ci, ce qui est un avantage à divers égards; elle se rapproche comme coloration des

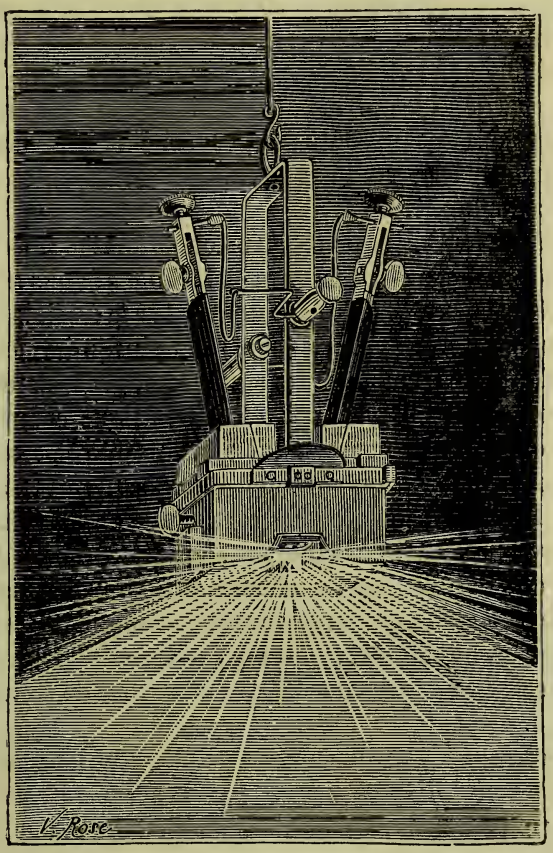


Fig. 333. — Lampe soleil. (*La Lumière électrique.*)

lumières que nous sommes habitués à voir, lumière du soleil, du gaz et des lampes, bien plus que la lumière de l'arc.

La lampe-soleil ne se rallume pas automatiquement si une extinction de quelque durée se produit; si au contraire l'extinction a été courte, de moins d'une minute, par exemple, l'arc se reforme. Cela tient à ce que la masse de chaux étant assez notable ne se refroidit que lentement et qu'il faut plus d'une minute pour que sa tempé-

rature se soit abaissée au-dessous du point où l'arc peut se former. Cette propriété du bloc de chaux d'être comme un réservoir de chaleur a de plus l'avantage d'atténuer les irrégularités du courant; la température de la chaux ne varie pas instantanément comme l'intensité de celui-ci, elle est le résultat de l'intensité moyenne. Si le courant s'affaiblit, la température s'abaisse lentement et est très peu diminuée au moment où le courant reprend son intensité primitive, et inversement.

Ce fait, d'une part, et d'autre part le fait que l'on ne voit pas les pointes de charbon incandescentes expliquent qu'il n'est pas nécessaire que les charbons présentent une aussi grande homogénéité que dans les lampes où ce sont ces pointes incandescentes qui sont la vraie source de lumière.

458. Présent et avenir de l'éclairage électrique. — Nous avons indiqué les avantages de l'éclairage électrique et nous avons dit que les appareils permettent d'obtenir toutes les intensités lumineuses qui peuvent être nécessaires, depuis les plus minimes jusqu'aux plus considérables. Quelles sont actuellement les conditions dans lesquelles on peut employer la lumière électrique comme éclairage courant et que peut-on penser qu'il adviendra de ce système?

Si l'on veut un éclairage minime, quelques lampes à incandescence que l'on allume successivement dans diverses chambres, on peut employer une pile de quelques éléments, pile au bichromate de potasse que l'on dispose de manière à renouveler aisément tout ou partie du liquide et qui fonctionnant constamment est employée à charger des accumulateurs; ce sont ces accumulateurs qui, introduits le soir dans le circuit des lampes, serviront de source du courant.

Ce système est simple, il demande peu d'entretien; mais il paraît difficile d'évaluer, quant à présent, la dépense, et, par suite, de déterminer le prix de l'unité d'éclairement. C'est là une application qui semble avoir peu d'intérêt pratique.

La question à ce point de vue est déjà plus intéressante s'il s'agit d'éclairer un vaste appartement, un hôtel avec des salles de réception; dans ce cas et avec l'insuffisance générale de dispositions prises pour la ventilation, l'éclairage par incandescence est particulièrement indiqué, on peut dire qu'il s'impose. Il conviendra d'avoir dans ce cas une machine à gaz actionnant une machine d'induction qui fournira le courant; comme les machines seront, en général, surveillées d'une manière insuffisante et que, par suite, il pourrait survenir quelque arrêt provenant du moteur ou du gé-

nérateur de courant, il serait prudent d'avoir une batterie d'accumulateurs qui serait chargée dans la journée et qui resterait en réserve pour les cas d'accidents, ou qui, au besoin, ajouterait son effet à celui de la machine dans le cas où l'on voudrait un éclairage exceptionnel, supérieur comme intensité à l'éclairage courant. Les accumulateurs paraissent nécessaires, car on ne peut s'astreindre à avoir des machines de rechange; outre la dépense de premier établissement qui serait doublée, la place manque souvent.

Dans ces conditions, il est possible que l'éclairage par l'électricité ne soit pas d'un prix plus élevé que l'éclairage au gaz, en tout cas la différence n'est pas considérable; mais les avantages sont tels que nous nous étonnons que ce mode d'installation ne soit pas plus répandu.

Enfin, il arrive que l'on a de vastes établissements dans lesquels le service de l'éclairage a une importance très grande et dans lesquels on peut et on doit prendre toutes les dispositions nécessaires pour l'assurer de la manière la plus complète et la plus satisfaisante. Dans ces cas, il ne paraît pas douteux que l'éclairage électrique, plus satisfaisant à tous égards, est moins coûteux que l'éclairage au gaz. Il faut, bien entendu, une installation complète et un service spécial d'entretien : le moteur est, suivant les cas, une puissante machine à gaz ou mieux une ou plusieurs machines à vapeur; il y a un certain nombre de machines génératrices du courant, nombre réglé par la puissance exigée, par la disposition des circuits divers sur lesquels sont réparties les lampes; il est indispensable d'avoir une machine de rechange toujours prête à fonctionner pour parer aux accidents qui pourraient survenir. Il faut, dans certains cas, avoir dans le circuit un ou plusieurs rhéostats de manière à pouvoir faire varier au moment opportun l'intensité du courant et par suite l'intensité de l'éclairement, soit d'une manière absolument générale, soit dans certains circuits, comme cela est nécessaire dans les théâtres pour produire les effets de lumière.

Il existe dès à présent un certain nombre de grands établissements éclairés à la lumière électrique parmi lesquels on peut citer l'Opéra de Paris.

Nous ne pouvons entrer dans le détail de ces installations; outre que la description serait fort longue, ces installations varient absolument suivant les conditions et nous n'en pourrions rien déduire de général.

Mais nous pensons que ce n'est point encore dans ces installations même considérables que réside l'avenir de l'éclairage électrique et

que c'est seulement lorsque sera résolue et appliquée la distribution de l'électricité que l'éclairage électrique se développera, d'autant plus rapidement que, outre les facilités que l'on trouvera pour l'installer, le prix sera notablement abaissé. Cette distribution est appliquée sur un réseau plus ou moins vaste dans diverses villes, à New-York, à Londres par exemple; quand le système aura la sanction du temps, qu'il sera mieux connu parce qu'il aura été étudié pendant son fonctionnement, il se développera, nous n'en doutons pas.

Nous n'insistons pas sur ce côté de la question parce que nous aurons à reprendre ultérieurement, et d'une manière générale, cette question de la distribution de l'électricité [1].

1. Pendant l'impression, des installations générales de distribution d'électricité pour l'éclairage ont commencé à fonctionner à Tours et à Dijon; nous n'avons pas encore de données suffisantes pour apprécier les résultats qui paraissent satisfaisants d'ailleurs.

CHAPITRE III

LES ACTIONS MÉCANIQUES ET LES COURANTS

459. — On pourrait faire entrer dans ce chapitre presque toutes les applications dont il nous reste à parler : les avertisseurs, indicateurs, télégraphes et autres appareils dans lesquels on utilise des électro-aimants fonctionnent par suite des mouvements qui résultent de la mise en action de ces électro-aimants. Nous les renvoyons cependant au chapitre suivant, dans lequel nous réunirons les applications dans lesquelles les courants sont employés surtout à cause de la quasi-instantanéité de leur action et où on ne leur demande pas en général de développer un travail appréciable, leur rôle étant presque toujours de produire un enclenchement ou un déclenchement.

Les téléphones pourraient figurer au chapitre présent ainsi que quelques télégraphes car le courant n'agit pas seulement pour permettre ou empêcher l'action d'un moteur mécanique, il est la source même de l'énergie utilisée ; nous croyons qu'il n'y a pas intérêt à conserver, à ce point de vue, un ordre strictement rigoureux et qu'il y a avantage à ne pas séparer des appareils semblables sur nombre de points, comme le sont les divers modèles de télégraphes. Il nous a semblé inutile aussi de séparer les téléphones des télégraphes et autres moyens de communication à distance.

Nous ne traiterons donc que les applications dans lesquelles le courant électrique produit une action mécanique intéressante par son intensité, soit qu'elle se traduise par une attraction notable, soit par le développement d'un travail mécanique notable. Parmi ces applications se trouvent les questions capitales de la distribution de l'électricité et de la transmission de l'énergie.

Comme dans les chapitres précédents, nous traiterons d'abord la

production des courants par les actions mécaniques, c'est-à-dire la question générale des machines d'induction.

460. Théorie générale des machines d'induction. — Considérons un induit quelconque se mouvant circulairement dans un champ magnétique varié obtenu, par exemple, par une série de pôles de noms contraires régulièrement alternés. Cet induit, en parcourant l'espace ainsi rendu actif, sera traversé par des courants qui se produisent dans un sens ou dans l'autre, quelle que soit la forme de cet induit. Entre ces parties où se produisent des courants de sens contraires, parties que nous caractériserons symboliquement par les signes + et —, il existera des lignes où le courant produit sera nul : avec A. Bréguet, nous appellerons ces lignes, *lignes de commutation*. Il est évident que les phénomènes se reproduisant identiquement

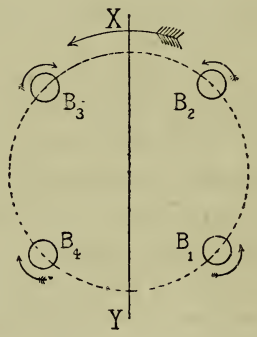


Fig. 334. — Principe des machines d'induction.

après un tour complet, le nombre de ces lignes de commutation est nécessairement pair : il y aura donc au moins deux lignes de commutation, constituant un *diamètre de commutation*.

Le cas le plus simple qui puisse se présenter est dès lors le cas où il y a seulement un diamètre de commutation XY (fig. 334) et où, par conséquent, le champ magnétique est divisé en deux parties seulement où il se produit des courants de sens inverse ; on peut concevoir que dans un champ ainsi constitué il se meuve un seul induit, une seule bobine qui, dans l'espace d'une révolution sera animée par deux courants inverses, chacun d'eux durant, avec des intensités variables, pendant le temps qui correspond à une demi-révolution. Il est bien entendu que le résultat est le même, que le champ magnétique soit fixe et par conséquent fixes aussi les inducteurs, tandis que la bobine se meut, ou inversement.

S'il s'agit de recueillir les courants produits sans les redresser, il suffit de maintenir en communication les extrémités du fil de l'induit avec les extrémités du fil du circuit extérieur, soit directement si l'induit est fixe, soit par l'intermédiaire de bagues métalliques sur lesquelles appuient des frotteurs à ressort si l'induit est mobile.

Si l'on veut avoir un courant ayant toujours le même sens dans le circuit extérieur, malgré les changements de sens qui se produisent dans l'induit, il faut avoir recours à un *redresseur* de courant. La disposition de cet appareil est très variable suivant l'appareil considéré, notamment suivant le nombre et la disposition des inducteurs et des induits suivant que les uns ou les autres sont fixes, etc. Nous avons déjà décrit (199) des appareils de ce genre; nous en verrons d'autres plus loin.

Dans cette théorie générale, nous emploierons toujours l'expression de *bobines* pour exprimer l'élément induit sans rien préciser sur la forme et la position de cette bobine; c'est que, en effet, si cette forme et cette position suffisent pour caractériser industriellement un type de machines, c'est surtout le mode de liaison des induits qui doit être considéré au point de vue de la théorie du fonctionnement. Il nous arrivera même de désigner sous ce nom générique de bobines des éléments rectilignes, comme dans les machines de Siemens : le fait que ces éléments lorsqu'ils se meuvent dans un champ magnétique, sont le siège de forces électromotrices qui changent de sens quand ils passent à une ligne de commutation, rend possible cette assimilation à une bobine, pour l'explication.

461. Étude géométrique des dispositions relatives principales des induits. — La disposition que nous venons d'indiquer n'est jamais adoptée : on conçoit en effet que, par une simple raison de symétrie, il y a toujours avantage à adopter au moins deux induits que l'on place sur un même diamètre.

Il est évident que dans ce cas les deux induits sont toujours parcourus par des courants qui sont constamment de sens contraires, l'un par rapport à l'autre. C'est ce qui se présente notamment dans la machine de Clarke, dans celle de Pixii, et dans celle de Siemens.

Il serait possible dans ce cas, on le conçoit, de recueillir séparément le courant produit dans chaque bobine à l'aide d'un dispositif analogue à l'un de ceux que nous venons d'indiquer. Mais, en réalité, on utilise simultanément les deux actions pour produire un courant unique, ce à quoi l'on arrive de deux façons différentes.

Quelle que soit l'origine de cet effet, il se manifeste dans l'induit une force électromotrice qui est susceptible de produire les mêmes

actions que produirait un élément de pile. Dans le cas que nous étudions, tout se passe à un moment donné, comme si nous avions deux éléments de pile agissant simultanément : nous savons alors que l'on peut à volonté les réunir en tension ou en quantité. De même pourrons-nous faire avec les induits : on les réunira en tension en les disposant de façon que les courants que chacun est susceptible de produire soient de même sens dans le circuit que, par conséquent, les fils des deux bobines seront réunis de manière que les enroulements à partir du point de jonction se fassent en sens contraire.

Les deux induits sont alors dans la même condition que deux éléments de pile réunis par deux pôles de noms contraires. S'il n'existe pas d'autre connexion il se manifeste une différence de potentiel, mais pas de courant. Le courant se produit si les extrémités opposées des fils des induits sont reliés entre eux par un circuit extérieur. Dans ce circuit d'ailleurs, le courant sera alternatif ou redressé suivant que l'on établira les contacts entre les pièces mobiles et les pièces fixes par l'un des procédés que nous avons indiqués précédemment, leur rôle dépendant non du nombre des induits mais des états électriques opposés dans lesquels se trouvaient les extrémités du fil constituant le circuit induit quelle qu'en soit la disposition.

Ce mode de jonction est celui employé dans les machines de Clarke (bobines à fil fin), et est aussi celui qui correspondrait à la bobine Siemens s'il n'y avait qu'un seul tour de fil, parce qu'alors les fils situés de part et d'autre du noyau sont parcourus par des courants inverses, mais que leur réunion les rend concordants. En réalité, il y a plus de deux tours, mais on peut concevoir qu'il y ait seulement à peu près multiplication des effets.

462. — Mais étant donnés deux induits correspondant chacun à une force électromotrice déterminée à un certain instant, on peut les réunir par leurs extrémités de même signe, soit en opposition, comme deux éléments de pile que l'on réunit par leurs pôles de même nom. Dans ce cas, s'il n'y a pas de circuit extérieur, les actions se détruisent et aucun effet ne se manifeste. Mais si on introduit un circuit extérieur aboutissant aux points où se réunissent les extrémités de même signe, il s'établira une dérivation et ce circuit sera alors traversé par un courant.

Le courant que l'on recueillera ainsi dans le circuit extérieur sera à volonté alternatif ou continu, suivant que l'on interposera ou non un redresseur.

Cette disposition est celle que l'on trouve dans la machine de

Pixii ou dans la machine de Clarke lorsque l'on emploie des bobines à gros fils.

Chacune de ces dispositions correspond à des circonstances spéciales qui sont analogues entièrement à celles qui se présentent dans le cas du groupement de deux éléments de pile et aucune n'est, d'une manière absolue, supérieure à l'autre : le choix à faire dépend des circonstances qui se présentent.

463. — Au lieu de deux bobines, de deux circuits se mouvant dans un champ magnétique présentant un seul diamètre de commutation, on peut concevoir qu'il y en ait un nombre pair quelconque $2n$; dans ce cas, à un instant quelconque, elles se partageront nécessairement en deux groupes séparés par le diamètre de commutation et tels que toutes les bobines d'un même groupe seront parcourues par des courants de même sens et que toutes celles de l'autre groupe seront parcourues par des courants de sens opposé.

Plusieurs solutions générales sont possibles dont deux sont analogues à celles que nous avons indiquées pour les machines à deux bobines induites :

1° Réunir toutes les bobines en un seul circuit par des connexions variées, des commutateurs, qui établiront des relations ayant pour effet de faire de ces bobines un seul circuit dans lequel le courant aurait partout le même sens et qui présenterait deux extrémités libres auxquelles seraient reliées les extrémités du circuit extérieur; cette disposition dans laquelle toutes les bobines seraient reliées en série n'a pas été employée, à notre connaissance.

2° Réunir toutes les bobines en un seul circuit; s'il était seul, il n'y aurait aucun courant, les forces électromotrices égales et contraires qui prennent naissance de part et d'autre du diamètre de commutation se faisant respectivement équilibre; mais si on vient à réunir deux points du circuit et principalement ceux qui séparent les bobines où se font les changements de sens de la force électromotrice, les deux moitiés agissent comme montées en séries parallèles par rapport à ce circuit extérieur dans lequel elles donnent naissance à un courant.

Deux dispositions principales ont été adoptées surtout : celle de Gramme et celle des machines Siemens et des machines Edison.

Dans la première disposition, toutes les bobines sont enroulées dans le même sens et toutes communiquent ensemble ; mais les fils de jonction de deux bobines voisines sont reliés à une pièce métallique mobile avec l'ensemble des bobines. Deux frotteurs A, B, (fig. 335) sont placés sur le diamètre de commutation et sont le

point de départ du circuit extérieur : on voit immédiatement que, entre ces frotteurs, il y a de chaque côté une série de bobines ayant toutes des forces électromotrices de même direction puisqu'elles sont d'un même côté du diamètre de commutation; les deux séries représentent donc, l'une par rapport à l'autre des forces électromotrices opposées, mais ces forces électromotrices sont concourantes par rapport au circuit extérieur dans lequel elles font naître un courant[1].

464. — Dans l'autre disposition les bobines sont reliées non plus aux bobines immédiatement voisines mais à d'autres bobines plus ou moins éloignées suivant un ordre déterminé et tel que le circuit se trouve également divisé toujours en deux parties où les courants sont de sens opposé. En réunissant par le circuit extérieur

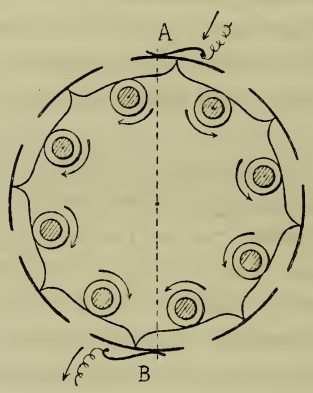


Fig. 335. — Principe du collecteur Gramme.

les points de division on retrouvera précisément les mêmes conditions que précédemment.

Des combinaisons très variées peuvent être employées et des solutions diverses ont été données (sinon sous cette forme même, au moins pour des formes équivalentes, comme nous le dirons) par von Hefner Alteneck, Frölich, Ant. Bréguet, Edison. Nous indiquerons deux dispositions correspondant à deux types essentiellement distincts.

I. Les bobines sont régulièrement espacées et leur nombre est de la forme $2(2n+1)$ comprenant $2n+1$ lames au collecteur

1. Pour simplifier les figures les lames collectrices sont indiquées en dehors des bobines; elles sont en dédans, en réalité.

(fig. 336) : la meilleure solution paraît être de réunir chaque bobine à la bobine diamétralement opposée (qui est par conséquent la $2n+1$, à la suite) et à la bobine qui est d'ordre $2n-1$. Une discussion facile à faire montre que les connexions diamétrales correspondent à des forces électromotrices qui sont toujours concordantes, car les bobines correspondantes sont nécessairement de part et d'autre du diamètre de commutation. Il n'en est pas de même des autres connexions parmi lesquelles il en est toujours deux, tout entières situées l'une d'un côté et la seconde de l'autre côté du diamètre de commutation pour chacune desquelles les forces électromotrices des bobines extrêmes sont contraires, de telle sorte que si on réu-

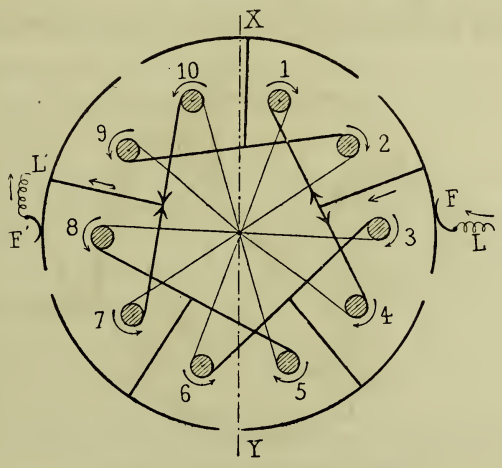


Fig. 336. — Principe du collecteur Edison.

nit par un circuit extérieur les conducteurs qui unissent ces bobines en aura un courant.

Le nombre des conducteurs entre lesquel s'établit successivement ce courant est $2n+1$: pendant que l'un d'eux parcourt l'espace d'un côté du diamètre de commutation il doit se trouver relié par le circuit extérieur successivement avec deux conducteurs situés de l'autre côté ; il en est de même d'ailleurs séparément pour chacun de ceux-ci. Il est aisé de se rendre compte alors comment doivent être établies les communications par l'intermédiaire des lames d'un collecteur et des frotteurs à balais.

II. Les bobines sont placées par couple, sur un même rayon ou à peu près, de manière que l'on puisse admettre exactement ou

approximativement que les deux bobines d'un même couple passent en même temps à la ligne de commutation (fig. 337).

Parmi les solutions qui peuvent être adoptées, nous indiquerons celle dans laquelle les connexions établies d'un côté sont diamétrales ou à peu près de manière que de ce côté les forces électromotrices qui prennent naissance aux deux extrémités d'un même conducteur sont concordantes; de l'autre côté des connexions s'établissent différemment. Le nombre des bobines étant de $4\,n$, il y a n connexions qui s'établissent respectivement entre chaque bobine d'une série et la $n - 1^e$ bobine suivante de l'autre série. Chaque conducteur formant une de ces connexions reste d'un même côté du diamètre de commutation pendant $\frac{1}{2n}$ de tour; il y a deux conducteurs parallèles situés au même instant de part et d'autre de ce diamètre. C'est ces

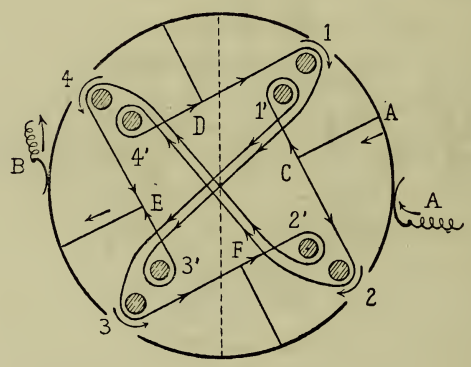


Fig. 337. — Principe du collecteur Frölich.

conducteurs qui doivent être reliés par le circuit extérieur, ce sont les seuls pour lesquels les forces électromotrices des bobines extrêmes sont en opposition. A partir de l'un de ces conducteurs, il y a deux circuits continus dans chacun desquels les forces électromotrices restent concordantes. Contrairement à ce qui se présente pour l'autre disposition les communications doivent subsister entre les deux mêmes conducteurs pendant tout le temps que chacun d'eux reste d'un même côté du diamètre de commutation.

Les commutations avec le circuit extérieur se font comme précédemment par un collecteur et des frotteurs à balais.

3° On peut concevoir d'autres dispositions très variées dans lesquelles les bobines seraient reliées entre elles de diverses façons de manière à établir, pour chaque série prise d'un côté du diamètre

de commutation, des groupements analogues à ceux que l'on peut faire avec les piles; il existe quelques dispositions que l'on peut rattacher à cette solution.

Enfin, si le champ magnétique comprend plus d'un diamètre de commutation, d'autres combinaisons seront possibles : elles rentreront plus ou moins complètement dans les dispositions générales que nous avons indiquées et elles se comprendraient facilement sans qu'il soit nécessaire d'insister, d'autant plus que le nombre des combinaisons possibles et considérables.

465. Étude de la machine magnéto-électrique. Caratéristique. — Avant d'aborder la description détaillée de quelques-uns des types qui sont en usage en France principalement, nous ferons quelques remarques sur la théorie de ces machines; cette théorie sera d'ailleurs incomplète, car nous négligerons volontairement quelques éléments de la question, les résultats auxquels nous parviendrons sont donc approximatifs; ils n'en présentent pas moins une utilité réelle.

Si n est le nombre des tours de spires sur la bobine induite, v la vitesse de celle-ci, H l'intensité du champ magnétique et E celle de la force électromotrice, on sait que cette dernière valeur est proportionnelle aux trois autres éléments et qu'on peut écrire, si l'on a choisi convenablement les unités :

$$E = nvH.$$

l'intensité du courant sera donnée, comme toujours, par l'équation

$$I = \frac{E}{R}$$

Si l'on fait fonctionner une machine magnéto-électrique en modifiant les conditions du fonctionnement, on reconnaît que les valeurs obtenues ne satisfont pas à ces formules. Par exemple, pour une machine donnée où n et H sont déterminées, marchant à une vitesse donnée v, on trouve que, faisant varier R et par conséquent I, on obtient des valeurs variables de E, ce qui ne devrait pas être d'après la première formule. Pour se rendre compte de ce résultat il faut remarquer que E ne serait constant que si H restait également constant : or, il n'en est rien; par suite du fonctionnement même de la machine, il y a une réaction du courant induit produit sur les aimants inducteurs, réaction qui affaiblit l'intensité du champ magnétique et d'autant plus que le courant produit est plus

intense : dans la valeur de E, ce n'est donc pas la valeur initiale de H qui devrait entrer, mais la valeur H′ réduite par suite de cette réaction.

On peut supposer comme première approximation que la valeur de H′ soit de la forme :

$$H' = H - KI$$

K étant une constante : il viendrait alors :

$$E = nvH - nvKI$$

La courbe représentée par cette équation et que nous étudierons plus loin a été appelée la *caractéristique* de la machine ; dans le cas actuel, elle représente une droite; ce résultat est sensiblement d'accord avec une courbe déterminée directement et indiquée par M. S.-P. Thompson, relative à une machine de Gramme de laboratoire à aimant.

L'existence de cette réaction est mise en évidence également lorsque l'on cherche à étudier l'influence de la vitesse ; la formule $E = nvH$ indiquerait qu'il y a proportionnalité pour une même machine entre E et v ce que l'expérience ne vérifie pas si l'on ne modifie pas le circuit. En effet l'équation plus complète :

$$E = nvH - nvKI$$

montre que la proportionnalité n'existe que si I conserve la même valeur : ce résultat est vérifié par l'expérience et en faisant varier la résistance de manière à maintenir le courant d'une machine à la même intensité M. Joubert, par exemple, a trouvé les nombres suivants :

v.	500	720	1070 tours par minute;
E	103	145	208 volts;

qui répondent presque exactement à la loi.

Sans qu'il soit nécessaire d'insister, on conçoit que les résultats précédents doivent être étendus aux machines à excitatrice, car pour celles-ci comme pour les machines magnéto-électriques la production (sinon la valeur) du champ magnétique est indépendante du courant produit : il n'en est pas de même pour les machines dynamo-électriques.

466. Étude de la machine dynamo-électriques. Caractéristique. — Étudions d'une manière générale les conditions de fonctionnement d'une machine dynamo-électrique.

Désignons par n le nombre des spires sur l'anneau induit, par v la vitesse de rotation, par H l'intensité du champ magnétique dans lequel se meut l'anneau; si E est la force électromotrice développée dans cet anneau, on a, d'après les lois de l'induction

$$E = nvH \tag{1}$$

Si R représente la résistance totale du circuit et I l'intensité du courant qui y circule, la loi de Ohm donne

$$I = \frac{E}{R}$$

et comme conséquence

$$I = \frac{nvH}{R} \tag{2}$$

Mais le champ magnétique est produit par l'action de l'inducteur et dépend de l'intensité du courant qui y circule, on a donc

$$H = f(I)$$

La forme de la fonction $f(I)$ dépend de la grandeur et du mode de construction de la machine considérée.

On déduit de là

$$I = \frac{nv}{R} f(I)$$

ou

$$\frac{I}{f(I)} = \frac{nv}{R}$$

Le premier membre ne contenant d'autre variable que I, on peut résoudre l'équation par rapport à cette quantité et écrire

$$I = F\left(\frac{nv}{R}\right) \tag{3}$$

la forme de la fonction $F\left(\frac{nv}{R}\right)$ est liée à la forme de $f(I)$ et dépend

par conséquent de la nature et de la grandeur de la machine considérée.

Dans de nombreuses séries d'expériences dont il a publié tous les détails, M. Frölich, pour une machine Siemens et Halske et pour une machine Gramme, a déterminé expérimentalement les valeurs de I et de $\frac{nv}{R}$ qui se correspondent et il a pu tracer une courbe représentant la relation $I = F\left(\frac{n\,v}{R}\right)$ en négligeant les erreurs accidentelles; il eut pu rechercher la forme de l'équation correspondante, il ne l'a pas fait et s'est contenté de tracer (fig. 338) la courbe $y = F(x)$ dans laquelle x a été pris égal à $\frac{nv}{R}$ et y à I.

467. — Il est à remarquer que l'on connaît trois relations entre les cinq variables I, E, R, H et v (n est constant pour une machine

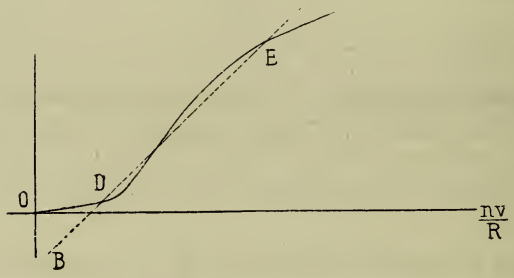


Fig. 338.

donnée); on peut donc se donner à priori deux de ces quantités et les trois autres seront déterminées.

Lorsque l'on examine la courbe obtenue OA (fig. 338), on reconnaît que, entre certaines limites, cette courbe s'écarte peu d'une droite DE; dans ces limites on pourra donc remplacer la fonction vraie de forme inconnue par une fonction linéaire à laquelle on peut donner la forme :

$$\frac{nv}{R} = a + bI$$

ou

$$I = \frac{1}{b}\left(\frac{nv}{R} - a\right) \qquad (4)$$

On peut se rendre compte aisément de la signification des cons-

tantes a et b. On voit que pour que le courant existe, pour que I soit positif, on ne peut donner à v une valeur quelconque : il faut que v ait une valeur supérieure à celle donnée par la relation :

$$\frac{nv}{R} = a$$

Pour cette valeur particulière, on aurait $I=0$: ce résultat correspond au fait que, pour que le courant se produise, il faut que la vitesse de l'anneau soit assez grande; si le nombre de tours effectué par minute est trop petit, le courant ne prend pas naissance; c'est là ce que l'on appelle les *tours morts*. Si la machine en action se ralentit jusqu'à cette vitesse, il y a *désamorcement*.

L'équation (2) combinée à l'équation (4) donne, d'autre part :

$$H = \frac{I}{a + bI} = \frac{1}{\frac{a}{I} + b}$$

On voit donc que b est l'inverse de H quand I tend vers l'infini. Il va sans dire que cette donnée est purement mathématique, car la forme simplifiée de l'équation que nous avons utilisée n'est applicable qu'entre des limites déterminées de I et que l'on ne peut étendre son application jusqu'à des valeurs infinies de I.

468. — De cette équation (4), M. Frölich déduit un certain nombre de conséquences qui ne sont pas sans intérêt, mais qu'il nous paraît inutile de développer ici. Nous allons l'utiliser d'une façon un peu différente, en cherchant à trouver la relation qui existe entre la force électromotrice et l'intensité dans un cas donné.

A cet effet, éliminons R entre les équations :

$$I = \frac{E}{R}$$

et

$$I = \frac{1}{b}\left(\frac{nv}{R} - a\right)$$

nous arrivons à la relation :

$$I = \frac{1}{b}\left(\frac{nvI}{E} - a\right)$$

ou

$$bEI - nvI + aE = 0$$

Si nous convenons de prendre I comme abscisse et E comme ordonnée, cette équation représente une hyperbole dont les asymptotes sont parallèles aux axes (fig. 339); l'une a pour abscisse $-\frac{a}{b}$ et l'autre a $\frac{nv}{b}$ pour ordonnée; cette hyperbole passe d'ailleurs par l'origine des coordonnées et, naturellement, la seule partie utile est celle qui correspond aux valeurs positives de I et de E; ajoutons même que, en réalité, la seule partie qui puisse fournir des données intéressantes et réelles est celle qui correspond à des valeurs moyennes de I, puisque c'est pour ces valeurs seulement qu'il est possible de remplacer la fonction générale (3) par la fonction linéaire (4).

Nous arrivons ainsi à la courbe que M. Marcel Deprez a désignée

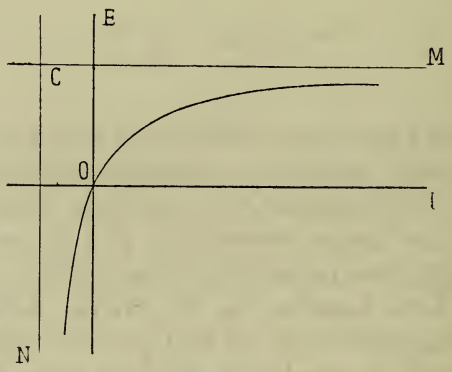


Fig. 339.

sous le nom de *caractéristique*, parce qu'elle permet d'étudier la manière de se comporter d'une machine donnée. M. Marcel Deprez obtient cette courbe d'une tout autre façon, fort ingénieuse d'ailleurs, mais certainement moins directe au point de vue théorique. Il est fort intéressant de remarquer que la forme qu'il donne à cette courbe paraît très analogue à celle de l'hyperbole que nous venons de trouver.

Cette courbe présente des propriétés importantes qui ont été bien analysées par M. Deprez, à l'aide de raisonnements délicats; nous pouvons les obtenir rapidement à l'aide de l'équation.

Résolvons cette équation par rapport à E, on a :

$$E = \frac{nvI}{a + bI}$$

Si on change la valeur de v, la caractéristique changera; on peut facilement tracer la nouvelle caractéristique, car on voit que pour une même valeur de I, l'ordonnée E varie proportionnellement à v. Ayant donc tracé la caractéristique OA (fig. 340) correspondant à une vitesse v, pour avoir le point M′ correspondant à une abscisse OP si la vitesse est devenue v', il suffira de prendre sur l'ordonnée PM un point M′ défini par la relation :

$$\frac{PM'}{PM} = \frac{v'}{v}$$

On opérerait de même pour autant de points que l'on voudrait.

On voit que le résultat serait analogue si, conservant constante la valeur de v, on venait à changer n, à la condition toutefois que ce

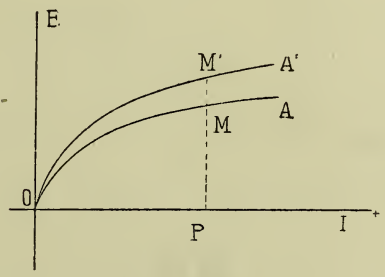


Fig. 340.

nouveau mode d'enroulement ne changeât pas la distance des fils de l'induit, puisque E est proportionnel à n.

469. — L'étude de la caractéristique fournit d'intéressants renseignements sur les conditions de fonctionnement de la machine. Soit OA (fig. 341) la caractéristique d'une machine déterminée fonctionnant dans des conditions données de vitesse; soient OP et PM les coordonnées d'un point représentant l'intensité et la force électromotrice se correspondant. On sait que la résistance totale du circuit déterminé par la relation $I = \frac{E}{R}$ a pour valeur $R = \frac{E}{I} = \frac{MP}{OP}$ c'est-à-dire que cette résistance est représentée par le coefficient angulaire de la droite OM, par *tg* MOP. On reconnaît immédiatement alors que lorsque la résistance diminue, l'intensité croît avec la force électromotrice, mais que les variations de celle-ci, rapides d'abord, deviennent peu sensibles assez promptement et peuvent

bientôt être regardées comme constantes au point de vue pratique.

On voit d'autre part que pour une caractéristique donnée la résistance ne peut jamais dépasser la valeur TOI qui correspond à la tangente à l'origine; pour cette valeur et pour les valeurs supérieures, il ne saurait y avoir de courants. Mais avec la même machine, en augmentant la vitesse, la caractéristique se relèvera et cette valeur de la résistance, valeur limite dans le premier cas, deviendra acceptable, un courant prendra naissance. On pourra donc ainsi trouver la plus petite vitesse qui, dans une machine donnée, produira un courant avec une résistance déterminée; cette vitesse correspondra aux *tours morts*, à la vitesse de *désamorcement*.

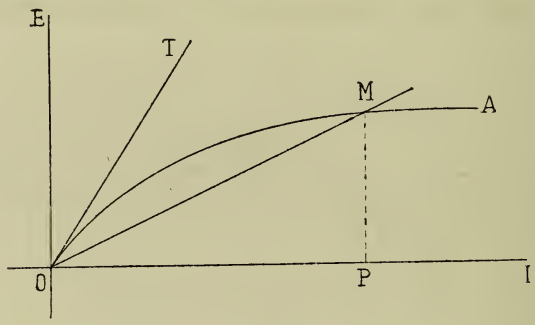


Fig. 341.

Il va sans dire que ce n'est là qu'une approximation, puisque nous savons que tous les résultats que nous signalons ne sont rigoureusement acceptables qu'entre les valeurs pour lesquelles la courbe de M. Frölich peut être remplacée par une droite.

On peut déterminer également quelle est la différence de potentiel qui existe entre deux points du circuit, par exemple aux bornes de la machine. Si R est la résistance totale du circuit, E la force électromotrice, r la résistance de la machine, e la différence de potentiel aux bornes, on sait (117) que l'on a :

$$\frac{e}{E} = \frac{R - r}{R}$$

Ceci rappelé, soient la droite OM (fig. 342), telle que R=*tg* MOP et la droite OI′ telle que $r = tg$ IOP; cette dernière droite coupant en

m l'ordonnée du point M, je dis que Mm mesure la différence de potentiel cherchée. On a en effet immédiatement :

$$\frac{mP}{MP} = \frac{r}{R}$$

d'où

$$\frac{Mm}{MP} = \frac{R - r}{R}$$

Mais MP mesure E, donc Mm mesure e.

Bien entendu cette construction n'est pas applicable seulement à la partie du circuit extérieure aux bornes; elle s'applique à une partie quelconque; il faudrait seulement prendre $tg\ m$OP repré-

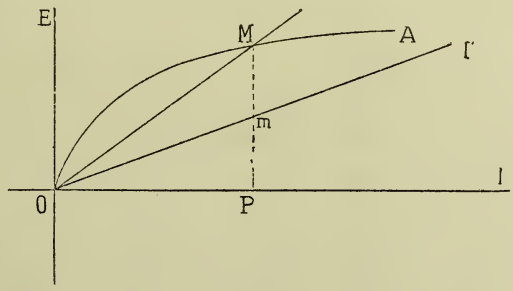


Fig. 342.

sentant la résistance de la partie du circuit limitée aux points considérés et comprenant la machine.

Il est intéressant de remarquer que la courbe OMA considérée comme rapportée aux axes OI' et OE joue par rapport à la différence de potentiel aux bornes le même rôle qu'elle joue par rapport à la force électromotrice lorsqu'elle est rapportée aux axes OI et OE; pour cette raison, on peut la désigner avec M. S. P. Thompson sous le nom de *caractéristique externe*.

470. — L'équation de la caractéristique ne montre pas comment intervient le nombre des tours de spires de l'inducteur; on peut à l'aide du raisonnement suivant comprendre comment il faut modifier la caractéristique si on fait changer ce nombre, le faisant passer par exemple de N à N'. Nous admettons que rien, sauf le nombre des spires, n'est modifié, c'est-à-dire que toutes les spires ont le même diamètre, le même développement et sont à la même distance des pièces sur lesquelles elles agissent. Dans ces conditions l'action

totale de l'électro-aimant, qui se compose de l'action des spires et de celle du noyau qui est aimanté par les spires doit, comme chacune de celles-ci être proportionnelle au produit NI, au moins approximativement : on aura donc un effet égal à l'aide d'un autre inducteur en le faisant traverser par un courant I′ tel que l'on ait $N'I' = NI$ ou $I' = I\frac{N}{N'}$. Si donc M (fig. 343) est un point de la caractéristique de la machine à N spires, pour avoir la même force électromotrice OQ à l'aide d'un inducteur à N′ spires, il faudra avoir une intensité obtenue en réduisant dans le rapport de N à N′ l'abscisse $\frac{OP'}{OP} = \frac{N}{N'}$ on aura ainsi un point de la nouvelle caractéristique; on répétera la construction pour autant de points qu'il sera jugé nécessaire pour permettre de tracer la courbe.

471. — Il importe de remarquer que pour une machine donnée

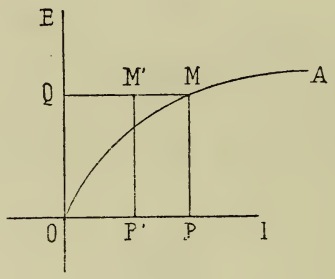


Fig. 343.

marchant à une vitesse déterminée, la force électromotrice manifestée dans l'induit ne dépend que de l'intensité du courant développé dans l'inducteur, sans qu'il soit nécessaire qu'il existe de liaison entre l'inducteur et l'induit : si on les sépare, qu'on fasse passer, à l'aide d'une source quelconque, un courant dans l'inducteur et qu'on mesure d'autre part la force électromotrice développée dans l'induit, on devra trouver précisément les valeurs correspondantes telles qu'elles résultent de la caractéristique.

Disons en passant que c'est précisément en opérant de cette façon que M. Marcel Deprez détermine expérimentalement la caractéristique d'une machine.

Cette remarque est importante, elle va nous donner la solution d'un cas intéressant.

Imaginons que, indépendamment du circuit enroulé sur l'inducteur, circuit que nous appellerons *circuit primaire*, nous enrou-

lions un autre fil, de manière que les distances puissent être considérées comme les mêmes : dans ce fil que nous désignerons sous le nom de *circuit inducteur secondaire*, circuit qui est complètement indépendant du circuit général, pendant que la machine fonctionne, faisons passer un courant provenant d'une source quelconque, indépendante absolument aussi. L'adjonction de ce circuit secondaire aura nécessairement pour effet de modifier la caractéristique en un mot. Cherchons ce que sera la nouvelle caractéristique.

La caractéristique a une équation de la forme $E = \varphi(I)$, dans laquelle I représente l'intensité du courant qui circule dans l'inducteur. Actuellement l'intensité du courant, qui met l'inducteur en action se compose de l'intensité I du courant qui existe dans le circuit inducteur primaire, et de l'intensité i qui agit dans le circuit secondaire. Les distances ayant été conservées les mêmes, l'effet est donc

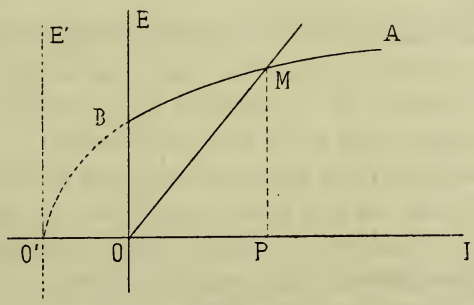


Fig. 344.

le même que s'il y avait un seul circuit inducteur traversé par un courant d'intensité $I + i$. On aura donc immédiatement l'équation de la caractéristique en écrivant $E = \varphi(I + i)$.

En appliquant cette remarque générale à l'équation que nous avons trouvée, on obtient, pour la caractéristique dans le cas considéré, l'équation :

$$bE(I + i) - nv(I + i) + aE = 0$$

qui, comparée à l'équation étudiée précédemment, montre que la caractéristique n'a pas changé de forme et que seulement l'axe des E a été déplacé vers la droite d'une quantité représentant l'intensité i du courant inducteur constant (fig. 344). Il va sans dire, d'ailleurs, que l'on ne peut utiliser que la partie AB de la courbe située à droite de l'origine.

On reconnaît immédiatement, à l'inspection de la figure, que, comme il était facile de le prévoir, les variations de la force électromotrice sont moins rapides que dans le cas précédent.

La résistance se trouve également déterminée dans ces conditions : soit un cas dans lequel la force électromotrice soit représentée par MP et l'intensité dans le circuit primaire par OP; la résistance sera représentée par le coefficient angulaire de la droite OM; on a :

$$R = tg\ MOP.$$

Il n'y a pas, bien entendu, à s'occuper de la partie OO′ qui correspond à un courant indépendant.

On voit aisément comment varient la force électromotrice et l'intensité lorsque la résistance change; les variations de la force électromotrice en fonction de la résistance sont moindres que dans le cas précédent.

Comme précédemment enfin, on déterminerait sans difficulté la différence de potentiel entre deux points quelconques du circuit, entre les deux bornes de la machine par exemple : il est inutile d'insister, la construction est la même absolument.

On reconnaît notamment que, dans ce cas, la différence de potentiel dont on dispose est plus grande qu'elle ne le serait dans une machine où il n'y aurait pas de champ magnétique initial.

Enfin, la figure montre également que, dans ce cas, il n'y a pas de tours morts : quelle que soit la vitesse et quelle que soit la résistance, il y a immédiatement une force électromotrice finie et une intensité déterminée.

Lorsque l'on examine les caractéristiques de machines dont les électro-aimants ont des dimensions un peu considérables, on reconnaît que, dans la première partie, la courbure est peu prononcée, de telle sorte que l'on peut admettre comme approximation que, dans des limites assez restreintes, la caractéristique est une ligne droite.

Il va sans dire que dans ses limites, il est possible d'appliquer aux caractéristiques rectilignes toutes les propriétés que nous avons reconnues pour les caractéristiques en général. Cette considération simple conduit à la solution de problèmes importants.

472. — Quelque intéressante et commode que soit la caractéristique, son emploi n'est pas indispensable pour étudier les diverses questions qui se posent dans l'étude des machines dynamo-électriques.

Nous avons montré comment on peut étudier les variations de E et de I en fonction de R ; on peut y arriver autrement :

Éliminons maintenant I entre l'équation (4) et la relation fondamentale $I = \frac{E}{R}$, il vient :

$$\frac{E}{R} = \frac{1}{b}\left(\frac{nv}{R} - a\right)$$

ou

$$aR + bE = nv$$

équation qui est complètement déterminée lorsque l'on a calculé a et b à l'aide d'expériences préliminaires qui ont conduit à l'équation (4).

Cette équation représente une droite (fig. 345) qui coupe les axes aux distances $\frac{nv}{a}$ et $\frac{nv}{b}$: on voit que les variations en moins de la force électromotrice sont proportionnelles aux accroissements de

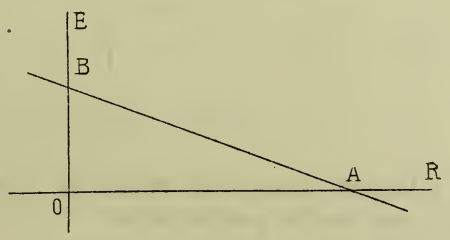


Fig. 345.

la résistance. On reconnaît aussi que pour une vitesse donnée et un induit donné, il y a une limite de la résistance que l'on ne peut dépasser, cette limite a pour valeur $OA = \frac{nv}{a}$ [1].

Si pour une machine donnée on change la vitesse, la droite se déplace parallèlement à elle-même ; il en est de même si, sans changer la vitesse, on modifie le nombre de spires de l'induit.

D'autre part, l'équation (4), par exemple, donne immédiatement la relation qui existe entre I et R ; elle peut s'écrire :

$$bRI + aR - nv = 0$$

1. La détermination de la tangente à la caractéristique à l'origine conduit à la même valeur.

Cette équation représente une hyperbole ayant un axe pour asymptote, l'autre GN (fig. 346) est donnée par l'équation :

$$I = -\frac{b}{a}$$

L'intensité décroît quand la résistance augmente ; la résistance ne peut d'ailleurs croître indéfiniment et ne peut atteindre les valeurs qui rendraient I négatif. On obtient cette valeur limite en faisant $I = 0$ dans l'équation : il vient pour cette valeur $R = \frac{nv}{a}$, c'est précisé-

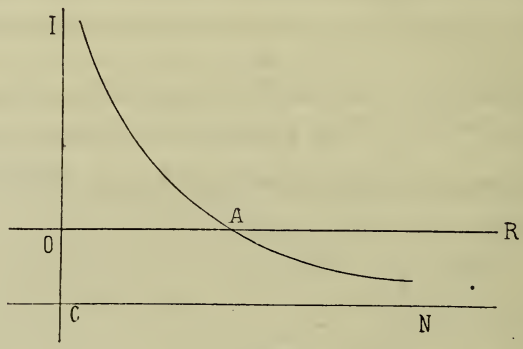


Fig. 346.

ment la même à laquelle nous avait conduit la courbe précédente.

L'équation de cette courbe peut s'écrire :

$$I + \frac{a}{b} = \frac{nv}{R}$$

$I + \frac{a}{b}$ mesure l'ordonnée comptée à partir de l'asymptote ; on voit que ces ordonnées, pour chaque valeur de R, croissent proportionnellement à n et à v; d'où le moyen, lorsqu'on connaît une courbe pour une valeur donnée de n et une valeur de v, de tracer les courbes correspondant à des valeurs quelconques de ces quantités.

Ces courbes ne se prêtent pas aussi bien que la caractéristique de M. Deprez à l'étude des cas où il existe un champ magnétique initial.

473. — Mais on peut, ce qui n'est pas sans intérêt, étudier par une autre formule les variations du champ magnétique en fonction de l'un quelconque des autres éléments, en fonction de l'intensité du courant, par exemple :

Éliminons R entre les équations (2) et (4); il vient :

$$\frac{nv}{R} = \frac{I}{H}$$

et

$$I = \frac{1}{b}\left(\frac{I}{H} - a\right)$$

équation qui peut se mettre sous la forme :

$$bHI + aH - I = 0$$

Cette équation représente une hyperbole (fig. 347) passant à

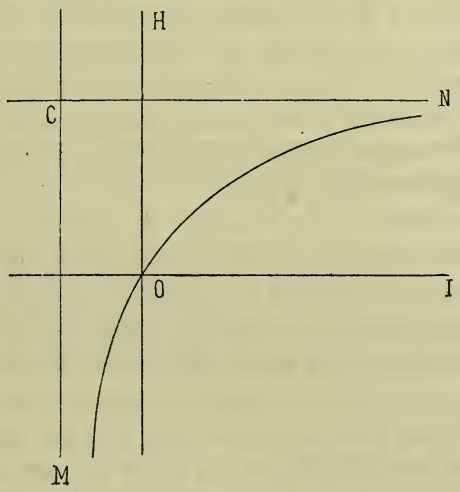


Fig. 347.

l'origine et dont les asymptotes sont déterminées par les relations :

$$I = -\frac{a}{b}$$

et

$$H = \frac{1}{b}$$

On voit que le champ magnétique croît d'abord rapidement, puis lentement ensuite et varie peu à partir d'une certaine valeur de l'intensité.

Ce résultat semble, d'une manière générale, être assez bien d'accord avec l'expérience ; M. S.-P. Thompson a déduit de mesures directes une courbe qui donne les valeurs du moment magnétique d'un électro-aimant en fonction de l'intensité du courant qui l'anime : approximativement au moins, la forme est celle que nous avons indiquée.

Les recherches qui ont conduit à la détermination de cette courbe ont permis d'analyser les éléments desquels dépend le moment magnétique de l'électro-aimant, et par conséquent la valeur du champ magnétique. En répétant les mesures avec la bobine seule, le noyau étant supprimé, on a trouvé que les valeurs variaient proportionnellement aux intensités, au moins très sensiblement.

Les ordonnées de la courbe totale, mesurées à partir de la ligne droite qui représente les effets de la bobine seule, mesurent la grandeur de l'action du fer doux. On voit que ces ordonnées croissent d'abord très rapidement, puis deviennent à peu près constantes ; les premières valeurs correspondent au cas où le fer n'est pas saturé, les secondes à celui où la saturation est complète ; les variations d'effet magnétique sont faibles alors et dues uniquement à l'action des spires de la bobine.

Dans des recherches sur ce sujet, M. Frölich avait essayé de représenter cette action par une formule telle : $H = \frac{I}{a + bI + cI^2}$ mais il reconnut qu'on pouvait la simplifier en supprimant le terme en cI^2. Il est intéressant de remarquer que l'on arrive au même résultat par la méthode que nous avons suivie et dans laquelle cette formule est une conséquence et non un point de départ.

474. — Quel que soit le système que l'on ait adopté pour les induits, on peut toujours disposer la pièce qui sert à recueillir les courants produits dans les bobines successives de manière à ce que, à volonté, les courants résultants qui traversent le fil extérieur soient redressés ou conservent leurs variations de sens.

Sans qu'il puisse y avoir rien d'absolument général à cet égard, nous dirons que le redressement est plus facile au point de vue pratique lorsque les induits sont mobiles que lorsqu'ils sont fixes.

Il importe de remarquer que les courants redressés ne peuvent pas être assimilés d'une manière absolue à des courants continus ; l'intensité y varie constamment et d'une manière appréciable : il est aisé de s'en rendre compte. Supposons développée en ligne droite la circonférence que parcourt la bobine induite supposée mobile, et représentons pour chaque position par une ordonnée la valeur de l'intensité, cette ordonnée étant portée au-dessus ou au-

dessous de l'axe suivant que le courant aura un sens déterminé ou le sens inverse; la courbe symbolique des intensités du courant produit directement sera une ligne sinueuse coupant autant de fois l'axe qu'il y a de lignes de commutation (fig. 348 et 350).

Le redresseur de courant amenant l'interversion au moment du passage à la ligne de commutation, la courbe symbolique se composera de toutes les parties situées au-dessus de l'axe primitivement, plus les symétriques de toutes les parties qui étaient au-dessous de l'axe (fig. 349 et 351). Elle sera donc complètement différente de

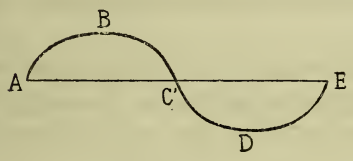


Fig. 348.

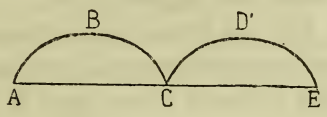


Fig. 349.

celle qui correspond à un courant continu qui est une droite parallèle à l'axe, sauf pendant les périodes d'état variable de fermeture et de rupture (108).

Dans un certain nombre de cas, ces variations d'intensité qui peuvent être très rapides sont sans inconvénient et le résultat est le même que si l'on avait un courant continu d'intensité moyenne : mais il n'en sera pas ainsi dans tous les cas et, par exemple, cette

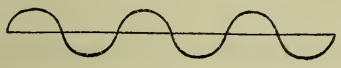


Fig. 350.

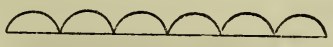


Fig. 351.

disposition ne serait pas sans inconvénient dans la plupart des systèmes de télégraphie.

On peut obvier à cet inconvénient au moins dans une certaine mesure, en employant plusieurs couples de bobines, leur nombre différant de celui des lignes de commutation, de manière que les bobines ne passent pas ensemble aux points où l'intensité est nulle ni à ceux où elle est maxima. Dans ce cas, on observe l'effet résultant, la somme de toutes ces actions et on a une courbe encore sinueuse, mais dont les variations d'ordonnées sont bien moindres; la régularisation est d'autant plus satisfaisante que le nombre des

couples est plus considérable; elle est déjà très notable lorsque les couples de bobines sont tels que les uns passent au maximum lorsque les autres sont en face des lignes de commutation (fig. 352).

Une machine est dite à courants continus lorsque le nombre de couple de bobines est assez grand pour que la somme de toutes les actions soient sensiblement constantes, ces actions se produisant toutes dans le même sens.

Une machine est dite à courants redressés quand les couples de bobines sont réunis au circuit extérieur par un collecteur ou commutateur qui y fait naître un courant ayant toujours le même sens, mais où le nombre des bobines est petit et où les variations d'intensité sont appréciables.

Elle est dite à courants alternatifs lorsque les alternatives de sens qui se manifestent nécessairement dans les bobines en passant d'un côté à l'autre d'une ligne de commutation ne sont pas compensées

Fig. 352.

par le collecteur des courants et que ces alternances se reproduisent dès lors dans le circuit extérieur.

475. Conditions générales d'établissement des machines d'induction. — La production des courants induits dans les machines magnéto et dynamo-électriques exige plusieurs éléments indispensables :

1° Un champ magnétique;

2° Un circuit comprenant une partie qui possède un mouvement relatif par rapport au champ magnétique, soit que cette partie mobile (bobines induites) se meuvent par rapport au champ magnétique, soit que ces bobines restent fixes, le champ magnétique subissant au contraire un déplacement continu;

3° Des pièces, commutateurs ou collecteurs, permettant de recueillir de la façon correspondante au but que l'on veut atteindre les courants produits dans les bobines.

Il y a, pour faire une étude d'ensemble des machines d'induction, à examiner séparément chacune de ces conditions ainsi que les relations qu'elles peuvent avoir entre elles. Il sera possible ensuite de faire comprendre les dispositions générales des divers modèles qui ont été adoptés.

476. Des inducteurs. — La constitution d'un champ magnétique est obtenue soit par la présence d'aimants permanents soit par celle d'électro-aimants.

Dans le cas d'aimants, et pour obtenir la plus grande variation possible du champ magnétique, il faut que sur le trajet des parties induites mobiles ou, plus exactement, le plus près possible de ce trajet, on dispose des pôles alternés. On arrive à ce résultat, par exemple, à l'aide de barreaux en fer à cheval que l'on dispose successivement dans le même ordre (machine Méritens), ou bien à l'aide de barreaux aimantés rectilignes que l'on place parallèlement et en intervertissant alternativement les pôles (machines Méritens, type d'atelier).

D'autre part, afin que la variation la plus grande du champ magnétique se trouve dans le voisinage de la partie traversée par les

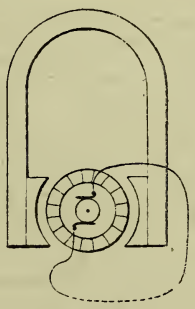


Fig. 353.

induits, on peut adapter aux pôles des pièces de fer de formes variables, prolongements polaires qui viennent presque au contact des induits mobiles. C'est ce que l'on trouve, par exemple, dans la machine Gramme de laboratoire (fig. 353), dans les machines Méritens, etc.

Le champ magnétique varié peut être produit par la présence d'électro-aimants dont les fils sont parcourus par un courant dont l'origine peut varier. La constitution du champ dépend à la fois de l'action du courant qui passe dans les bobines et de l'aimantation du fer doux qui sert de noyau aux électrodes. Cette dernière action n'est pas indispensable et l'on a construit certaines machines dans lesquelles les bobines inductrices, celles qui donnent naissance au champ magnétique, ne présentent pas de noyau métallique. Abstraction faite de la différence d'intensité qui peut être compensée par

d'autres actions, comme nous le dirons, le résultat est le même dans les deux cas.

Les électro-aimants doivent être placés de manière à ce que les pôles de noms contraires alternent, ce à quoi l'on peut arriver par les mêmes dispositions que pour les aimants. Mais de plus on peut faire agir ces électro-aimants non par leurs extrémités, mais par des points conséquents obtenus en leur milieu par un changement que l'on produit en ce point dans le sens de l'enroulement des fils (machine Gramme à galvanoplastie).

Comme pour les aimants, on peut armer les pôles ou les points conséquents de pièces de fer doux qui se rapprochent autant que possible des induits.

Enfin même (machine Jurgensen et Lorenz) ces parties métalliques, prolongements, épanouissements des pôles ou points con-

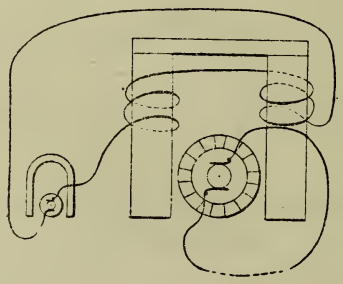


Fig. 354.

séquents peuvent contourner le chemin parcouru par les induits de manière à entourer ceux-ci le plus possible et rendre ainsi actives des parties de fil de l'induit qui étaient inutilisées à peu près complètement dans les autres dispositions.

477. — On peut concevoir que les bobines inductrices reçoivent un courant qui serait fourni par une pile; mais en réalité, il n'en est jamais ainsi. Le courant qui, passant dans ces bobines, produit le champ magnétique varié est toujours dans la pratique un courant induit. Tantôt il est produit par une machine distincte, dite *machine excitatrice* (fig. 354), dont le type adopté peut varier avec les circonstances, et qui quelquefois fait corps avec la machine principale (machine auto-excitatrice de Gramme); tantôt au contraire le courant qui anime les électros inducteurs est emprunté à la machine principale: cette disposition caractérise les machines dynamo-électriques.

Nous avons indiqué (203) comment on peut concevoir dans ce cas que la machine commence à fonctionner.

On voit que si l'on emploie une machine excitatrice, il y aura deux circuits distincts dans l'appareil considéré : l'un comprendra l'excitatrice et les électro-inducteurs, l'autre comprendra seulement le système induit et le circuit extérieur. Si l'on n'emploie pas d'excitatrice, les inducteurs, le système induit et le circuit extérieur constituent un seul circuit.

Mais dans ce dernier cas, deux dispositions différentes peuvent être adoptées. On peut ne former qu'un circuit unique comprenant les induits, les inducteurs et le circuit extérieur qui seront alors disposés en *série*, ou comme on a dit aussi en *tension* (fig. 355). On peut au contraire diviser le courant au sortir du système induit en deux dérivations, l'une qui comprend les inducteurs, l'autre qui com-

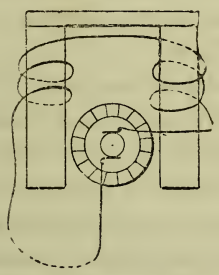


Fig. 355.

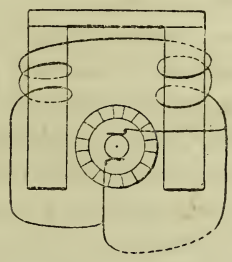


Fig. 356.

prend la résistance extérieure : la machine est montée en *quantité* ou en *dérivation* (fig. 356).

Il peut également y avoir des variétés dans ces dispositions, car comme il existe généralement plusieurs inducteurs, et bien que leur ensemble soit monté en série ou en dérivation avec le circuit extérieur, ils peuvent eux-mêmes être montés en série ou parallèlement.

Il est impossible de prévoir à l'avance quelle est la meilleure disposition et dans chaque cas particulier une discussion détaillée permettra seule de choisir celle qu'il convient de prendre pour atteindre un effet déterminé.

Enfin, dans un but dont nous signalerons plus tard l'intérêt, on peut disposer autour des inducteurs deux fils distincts, l'un qui soit traversé par le courant d'une excitatrice, l'autre qui est traversé par le courant de la machine même ; c'est ce qui constitue la *double excitation*.

478. — Dans toutes les machines d'induction en usage le mouvement des parties mobiles est une rotation autour d'un axe. Suivant les modèles, ce peuvent être les inducteurs ou les induits qui sont animés de ce mouvement de rotation ; mais dans l'un et l'autre cas, il importe de définir la situation relative des inducteurs et des induits par rapport à cet axe.

Qu'il s'agisse d'un barreau aimanté ou d'un électro-aimant il nous suffira de définir la position de l'axe.

Les axes des inducteurs peuvent être parallèles à l'axe de rotation ; c'est le cas des aimants dans la machine Méritens, type d'atelier, et des électro-aimants dans la machine Gramme à courant continu et dans la machine Brush.

Les axes des inducteurs peuvent être dans des plans perpendiculaires à l'axe de rotation, mais sans rencontrer celui-ci. Cette disposition s'observe pour les aimants dans la machine Gramme de laboratoire et pour les électro-aimants dans les machines à courants continus, système de M. Heffner von Alteneck.

Les axes des inducteurs peuvent être perpendiculaires à l'axe de rotation qu'ils rencontrent, et présenter ainsi une disposition rayonnée. Nous signalerons comme modèle de cette disposition pour les aimants des machines de l'Alliance et pour les électro-aimants les machines à courants alternatifs et à division de Gramme.

479. Des induits. — Le circuit induit doit posséder un mouvement relatif par rapport au champ magnétique : il doit donc se composer de pièces mobiles si les inducteurs sont fixes. Les pièces qui le constituent peuvent être fixes si les inducteurs sont mobiles. Il serait admissible que les induits et les inducteurs fussent en mouvement les uns et les autres, en sens contraire par exemple, mais ce double mouvement entraînerait pour sa réalisation des complications mécaniques et n'est jamais appliqué.

Les induits sont constitués soit par des fils de cuivre soit par des bandes d'une section plus considérable.

La disposition de ces conducteurs peut varier : tantôt ils sont enroulés en spires serrées et sur plusieurs rangs autour d'un cylindre, constituant alors des *bobines* proprement dites, le fil étant naturellement recouvert de matières isolantes de manière que le courant le traverse dans toute sa longueur.

La base du cylindre est quelquefois circulaire (machines de Clarke, de Niaudet, de Lontin); d'autres fois elle est elliptique ou aplatie (machine Wallace Farmer), ou présente une forme plus ou moins ovoïde.

Le plus souvent le noyau de la bobine est constitué par un noyau de fer ou par un noyau formé de fils de fer placés parallèlement. Dans quelques machines cependant (machine à courants alternatifs et à division de M. Siemens), il n'y a pas de fer dans la bobine. Le fer par son déplacement dans le champ magnétique prend des polarités variables et ces changements concourent à la production du courant dans le fil induit; mais d'autre part, des courants induits se produisent dans le noyau de fer même et sont la cause d'un échauffement que l'on a intérêt à éviter; pour atteindre ce résultat, M. Gordon dispose au centre de ses bobines une lame de tôle pliée en forme de V.

480. — Les bobines peuvent avoir diverses positions par rapport à l'axe de rotation : tantôt leur axes sont parallèles à cette ligne (machines Clarke, Pixii, Niaudet, Wallace Farmer); tantôt ces axes sont placés dans un même plan perpendiculaire à l'axe de rotation et à la même distance, les bobines se trouvant ainsi distribuées sur une circonférence (machine Méritens); tantôt enfin les axes des bobines sont perpendiculaires à l'axe de rotation qu'ils rencontrent en différents points (machine Lontin), ces bobines induites présentant ainsi une disposition rayonnée; c'est à ce type qu'il conviendrait de rapporter les induits héliçoïdaux de Jablochkoff.

On peut rattacher aux bobines les anneaux qui depuis la machine Gramme sont si fréquemment employés. On peut, en effet, les considérer comme un cylindre dont on aurait courbé l'axe jusqu'à lui donner la forme d'une circonférence, ou plus exactement, ce sont plusieurs bobines ayant un noyau commun et continu (ce qui établit une distinction avec les induits de Méritens) et présentant dans leur ensemble la forme d'un cercle.

Le noyau est quelquefois formé de fil de fer et présente la forme circulaire (machine Gramme) ou polygonale (Burgin); quelquefois il est formé par un disque annulaire de fonte autour duquel est enroulé d'une manière discontinue, en général, le fil induit (machine Brush).

Nous ajouterons que, sur les bobines, le fil peut être enroulé de manière que l'épaisseur des rangées de spires soit partout la même (machine Clarke), ou qu'elle soit inégale, l'épaisseur étant plus grande, par exemple, à une extrémité (machine Lontin), ou au contraire vers la partie médiane (machine Burgin).

Dans d'autres appareils les conducteurs, fils ou rubans dans lesquels doit se produire le courant induit, sont disposés parallèlement, ou à peu près, à l'axe du cylindre sur lequel ils sont placés.

C'est Siemens qui paraît avoir employé cette disposition le premier : l'induit est constitué, dans certains modèles, par un fer présentant approximativement la forme d'un double T et le fil est disposé dans les espaces réservés ainsi de part et d'autre de l'âme de manière à ce que l'ensemble présente la forme cylindrique (fig. 357).

Dans ces cylindres induits, le mouvement de rotation se produit toujours autour de l'axe même du cylindre : les conducteurs placés sur les bases et dont la longueur est généralement petite par rapport à la longueur du cylindre sont les seuls qui n'aient aucune influence pour la production du courant induit.

Généralement les conducteurs employés sont des fils de cuivre isolés (machines Siemens, Heffner von Alteneck), mais on a quelquefois employé des barres de cuivre d'une section notablement supérieure à celle des fils (machine Edison) ; ces barres sont alors placées, à nu, à côté les unes des autres.

481. Des commutateurs, redresseurs ou collecteurs. — Si les

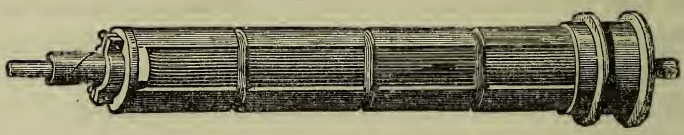


Fig. 357. — Bobine Siemens. (*La Lumière électrique.*)

induits sont fixes et qu'on veuille avoir des courants alternés, il n'y a aucune disposition particulière à prendre; il suffit de réunir au circuit extérieur les extrémités du fil d'une bobine pour avoir ces courants. On peut évidemment avoir ainsi autant de circuits distincts qu'il y a de bobines. En général, d'ailleurs, on n'opère pas ainsi, les bobines sont réunies toutes ensemble de manière à former un circuit unique ou par groupes; dans chaque groupe, d'ailleurs, on peut les réunir en série ou parallèlement, suivant les résultats que l'on veut obtenir; les conditions sont analogues à ce qui se présente pour les piles. Dans certains modèles, le groupement est fait d'une manière invariable, dans d'autres, les fils de chaque bobine aboutissent à des bornes accessibles aisément et auxquelles on peut attacher des fils de jonction réalisant le groupement que l'on désire.

Si les induits sont mobiles, les liaisons ne peuvent pas être aussi simples puisque les extrémités des fils des bobines sont entraînées dans le mouvement de rotation de celle-ci; on recueille les courants

de diverses manières suivant que l'on veut des courants alternés ou des courants redressés.

Si l'on veut des courants alternés, on emploie une disposition analogue à celle que nous avons déjà décrite : deux bagues métalliques sont placées à quelque distance sur un axe isolant (fig. 358) ; l'extrémité du fil B du circuit induit communique avec l'une des bagues par l'axe du cylindre qui est métallique, tandis que l'autre extrémité B′ communique avec la seconde bague ; on a, d'autre part, deux ressorts qui frottent chacun sur une bague et qui sont reliés métalliquement avec des bornes où aboutissent les extrémités du circuit. Il est clair que toutes les modifications qui se produiront dans les bobines se transmettront sans changement aucun dans le circuit extérieur.

Si l'on veut des courants redressés et que le nombre des bobines soit de deux on emploie une disposition analogue à celle de la

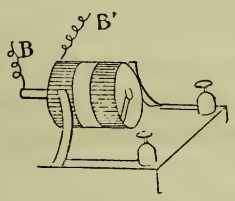


Fig. 358.

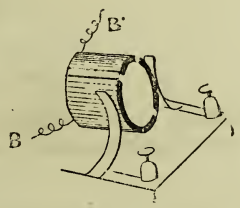


Fig. 359.

machine de Clarke (fig. 359). Les extrémités B, B′ du circuit induit aboutissent alors à deux demi-cylindres métalliques plaqués sur un cylindre isolant qui sert d'arbre de rotation, contre lesquels appuient deux ressorts servant de frotteurs et auxquels aboutissent les extrémités du circuit extérieur. On s'arrange pour que les parties isolantes qui séparent les demi-cylindres touchent les frotteurs à l'instant où les bobines traversent le diamètre de commutation. On comprend aisément que le sens du courant ne changera pas dans le circuit extérieur, puisque les contacts changeront à l'instant même où changera le sens du courant produit dans les bobines.

Lorsqu'il y a plus de deux bobines, on peut les grouper diversement, comme nous l'avons dit ; mais il est possible de les grouper deux à deux et d'établir pour chaque couple un commutateur identique analogue à celui que nous venons de décrire (machine Brush).

482. — S'il y a plusieurs bobines montées en série dans le circuit induit, on ne peut employer cette disposition, car toutes les bobines

ne passent pas en même temps au diamètre de commutation : on fait usage alors d'un *collecteur* dont on peut prendre pour type le collecteur de la machine Gramme (fig. 360).

Un collecteur de ce genre est constitué par une série de lames conductrices enchâssées dans un cylindre isolant parallèlement aux génératrices ; ces lames sont en nombre égal à celui des bobines et chacune d'elle est reliée aux extrémités des fils de deux bobines voisines, de telle sorte que toutes ces bobines se trouvent dans un même circuit.

En deux points diamétralement opposés, on place deux frotteurs F, F′ auxquels viennent aboutir les extrémités du circuit extérieur qui se trouve ainsi en dérivation sur le circuit des bobines constituant l'induit. Si ces frotteurs sont sur le diamètre de commutation, le

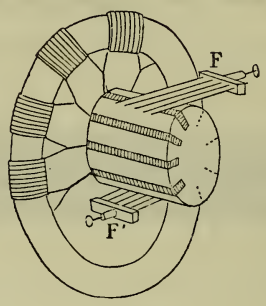


Fig. 360.

circuit dérivé sera parcouru par le courant le plus intense possible, parce que c'est en ces points que se trouve la plus grande différence de potentiel.

Ces frotteurs sont constitués quelquefois par des lames de ressort pressant sur le cylindre qui constitue le collecteur ; mais le plus souvent ce sont des pinceaux, des balais métalliques qui établissent le contact.

Si les frotteurs ne touchaient le collecteur que sur une très petite étendue, il y aurait interruption dans le circuit lorsqu'une partie isolante viendrait à le rencontrer. Pour éviter qu'il n'en soit ainsi, ils touchent la surface sur une certaine étendue de manière à ce qu'il y ait toujours contact au moins avec une lame métallique ; ils peuvent en toucher deux ou trois, les bobines correspondantes n'agissent pas alors pour produire le courant extérieur. C'est là un inconvénient, mais il est compensé par l'avantage qu'il ne se produit

jamais d'interruption, mais seulement de minimes variations d'intensité.

S'il y avait deux diamètres de commutation, il faudrait installer deux couples de balais; chaque couple pourrait alimenter un circuit distinct, ou bien on pourrait les réunir en série ou parallèlement suivant les cas.

483. — Considérons le cas simple d'une machine constituée par une couple de bobines dont les fils sont reliés entre eux et qui tournent dans un champ magnétique, et supposons que l'on veuille obtenir des courants redressés dans le circuit extérieur qui est mis en relation par des frotteurs avec les pièces métalliques isolées au nombre de deux auxquelles aboutissent les fils des bobines : pour plus de simplicité dans les explications, nous supposerons les inducteurs fixes et les induits mobiles, ce qui est le cas le plus ordinaire. Pour que le courant conserve le même sens, il faut évidemment que les contacts changent au moment où les bobines passent devant les lignes de commutation, c'est-à-dire que le même frotteur (par conséquent la même extrémité du circuit extérieur) soit toujours en communication avec celle des bobines qui est d'un côté déterminé de cette ligne de commutation. Si le changement se fait ailleurs que sur la ligne de commutation, pendant le temps que les bobines mettront à aller de cette ligne aux frotteurs le courant circulera, dans le circuit extérieur, en sens contraire du sens qu'il aura dans le reste du parcours des bobines. Le courant que l'on recueille n'est en somme que la moyenne des courants produits aux divers instants à cause de la grande vitesse de rotation, ce courant sera affaibli par cette action inverse.

Dans le cas le plus simple, celui où le champ magnétique est produit par deux pôles seulement, par raison de symétrie, la ligne de commutation théorique doit être parallèle ou perpendiculaire à la ligne des pôles; l'expérience montre que ce n'est pas sur cette direction qu'il faut placer les frotteurs pour obtenir le maximum d'effet, mais qu'il faut les écarter de cette position d'un certain angle pour atteindre ce résultat; cet angle est ce que l'on appelle l'*angle de calage des balais*, sa valeur, pour une même machine dépend, de la vitesse de rotation.

Ce fait prouve nettement que la ligne de commutation s'est déplacée d'un certain angle, qu'elle n'occupe pas la position déterminée par la théorie. Quelle explication peut-on donner de ce fait?

Quelques auteurs ont fait intervenir les noyaux de fer doux des bobines dont la polarité devrait changer au moment même du pas-

sage à la ligne de commutation, produisant ainsi un effet qui s'ajouterait à l'action du champ magnétique; ils pensent qu'il existe un certain retard à l'aimantation et à la désaimantation, de telle sorte que l'action du noyau ne change pas de sens au moment précis où se produit l'inversion due au champ magnétique. De ce fait résulte une irrégularité dans le champ magnétique, une sorte de torsion des lignes de force qui déplace les points où a lieu le maximum d'action et par suite doit déplacer les points où se produit la commutation. Une autre action doit intervenir, celle que le courant induit produit sur l'aimantation des inducteurs et sur celle des noyaux de fer doux; il y a là une réaction qui doit influer sur la forme et la disposition des lignes de force dans le champ magnétique.

Nous avons raisonné spécialement dans le cas de deux bobines, mais les conséquences sont les mêmes lorsqu'il y a un nombre quelconque de bobines reliées à un collecteur comme dans la machine Gramme. Il en serait de même aussi s'il y avait plus d'un diamètre de commutation; il faut autant de paires de frotteurs qu'il y a de diamètre de commutation et chaque frotteur doit être calé en avance sur la ligne de commutation correspondante.

Nous avons indiqué qu'il y a un inconvénient à ce que les balais touchent deux lames successives du collecteur; on peut le comprendre aisément, parce qu'au moment où il touche ces deux lames, il y a une bobine qui est mise en court circuit : les deux extrémités du fil sont reliées directement par le balai et la bobine ne concourt pas, ou du moins ne concourt que dans une proportion négligeable à la production du courant dans le circuit extérieur, tandis que toutes les bobines agissent lorsque le balai ne touche qu'une lame du collecteur. Mais cette différence est petite et a d'autant moins d'influence que le nombre des bobines est plus considérable.

Ce contact multiple produit un autre effet; il constitue, avons-nous dit un court circuit, mais ce circuit se trouve rompu par suite de la rotation du collecteur lorsque l'une des lames quitte le balai. Si celui-ci occupe une position quelconque les deux lames sont à des potentiels différents et il y a une étincelle qui se produit lors de la rupture, étincelle qui présente, entre autres, l'inconvénient de détériorer les contacts; aussi place-t-on les balais de manière à supprimer ces étincelles ou au moins à les réduire autant que possible; mais il n'arrive pas nécessairement que l'angle de calage que l'on est ainsi conduit à choisir soit celui qui est caractérisé par la condition que nous avons déterminée précédemment.

Il faut dire qu'il n'existe pas une théorie complète des machines d'induction qui permette de prévoir absolument les meilleurs conditions à réaliser dans un cas donné.

484. Classification des machines d'induction. — Le nombre des machines d'induction qui ont été imaginées et construites est considérable; les divers modèles ne diffèrent d'aillleurs souvent que par des modifications dont l'importance théorique est minime. Aussi ne décrirons-nous que les types les plus importants.

Comme nous l'avons dit, on peut classer les machines d'induction de diverses façons suivant le point de vue où l'on se place; nous adopterons ici l'ordre suivant :

I. — Machines dans lesquelles le champ magnétique est produit par des aimants permanents. — Dans cette classe rentrent des machines que nous avons déjà décrites : machines de Pixii, de Clarke, de Gramme (modèle de laboratoire), ce sont les machines magnéto-électriques.

II. — Machines dans lesquelles le champ magnétique est produit par des électro-aimants. — Il y a lieu d'établir ici une subdivision, car ces électro-aimants peuvent être excités par une autre machine d'induction, ou bien ils peuvent être excités par un courant fourni par la machine même, comme nous l'avons expliqué. Dans le premier cas on a des machines à excitatrices, et dans le second, des machines dynamo-électriques proprement dites.

Il faut remarquer que cette distinction n'a pas grande importance, car le mode d'excitation des électro-aimants peut varier pour une même machine avec les connexions que l'on établit et que l'on adopte suivant les conditions dans lesquelles doit fonctionner la machine.

Il peut être plus intéressant de distinguer les machines suivant qu'elles donnent des courants alternés ou des courants redressés; mais cette distinction n'est pas non plus absolue, car il est plusieurs modèles où l'on peut passer d'une forme à l'autre par un simple changement de commutateur.

Il est utile de remarquer que si les machines d'induction peuvent servir à donner naissance à des courants, elles peuvent réciproquement, au moins dans certains cas, être mises en mouvement quand on les fait traverser par un courant, comme nous le dirons plus loin. Il est quelques types que nous signalerons qui, moyennant de petites modifications peuvent servir aux deux usages, il en est d'autres qui sont plus spéciales.

485. Machines magnéto-électriques. Machines de l'Alliance. —

Cette machine imaginée par Nollet et destinée d'abord à donner des courants redressés a été achetée par la société l'Alliance et après avoir subi diverses modifications de détails est utilisée maintenant à donner des courants alternatifs : ce changement a permis la suppression du commutateur ou redresseur qui fonctionnait mal en donnant des étincelles vives et nombreuses.

Cette machine n'est autre chose que l'application du principe même de la machine de Clarke disposée de manière à multiplier l'action. Elle se compose essentiellement d'un certain nombre de disques de bronze fixés perpendiculairement à un axe de rotation et également espacés; ces disques portent à leur périphérie, et logées

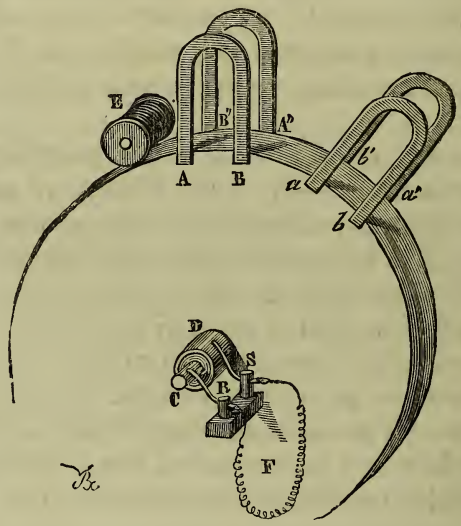


Fig. 361. — Principe de la machine de l'Alliance. (*La Lumière électrique.*)

dans des entailles convenablement disposées, des bobines E (fig. 361) au nombre de seize généralement et qui y sont invariablement maintenus parallèlement à l'axe de rotation.

Le bâti de la machine porte des aimants permanents en fer à cheval AB, *ab* disposés par tranches perpendiculaires à l'axe de rotation; chaque tranche comprenant dix-huit aimants est placée entre deux disques mobiles de manière que les pôles de ces aimants se trouvent en face des noyaux dont ils sont très rapprochés. Ils sont tellement disposés que les distances de ces pôles dans chaque tranche soient précisément égales à la distance des bobines de telle sorte que, à un même instant, toutes les bobines sont exactement en face des

pôles des aimants ou que, d'une manière plus générale, elles occupent toutes la même position relative par rapport au pôle voisin. Enfin, ajoutons que les aimants sont orientés de telle sorte que deux pôles voisins sont toujours de noms contraires.

Les plus grandes machines comportent six disques en bronze et

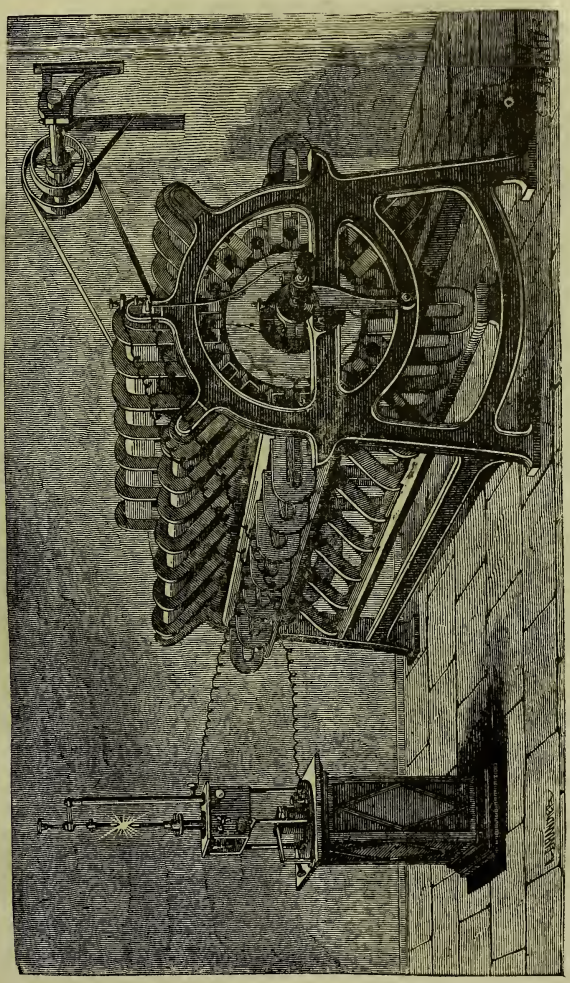


Fig. 362. — Machine de l'Alliance. (*La Lumière électrique.*)

sept tranches d'aimants; on ne peut guère dépasser ces nombres sans être obligés de donner à l'axe de rotation des dimensions exagérées.

La rotation simultanée des disques entraînant le mouvement des

bobines fera naître dans celles-ci des courants qui seront nécessairement de sens contraire dans deux bobines voisines; mais il est aisé de concevoir que par des liaisons convenablement établies on réunira, en les ajoutant, tous ces courants partiels : à cet effet, les extrémités des fils viennent se fixer à des plateaux de bois portés

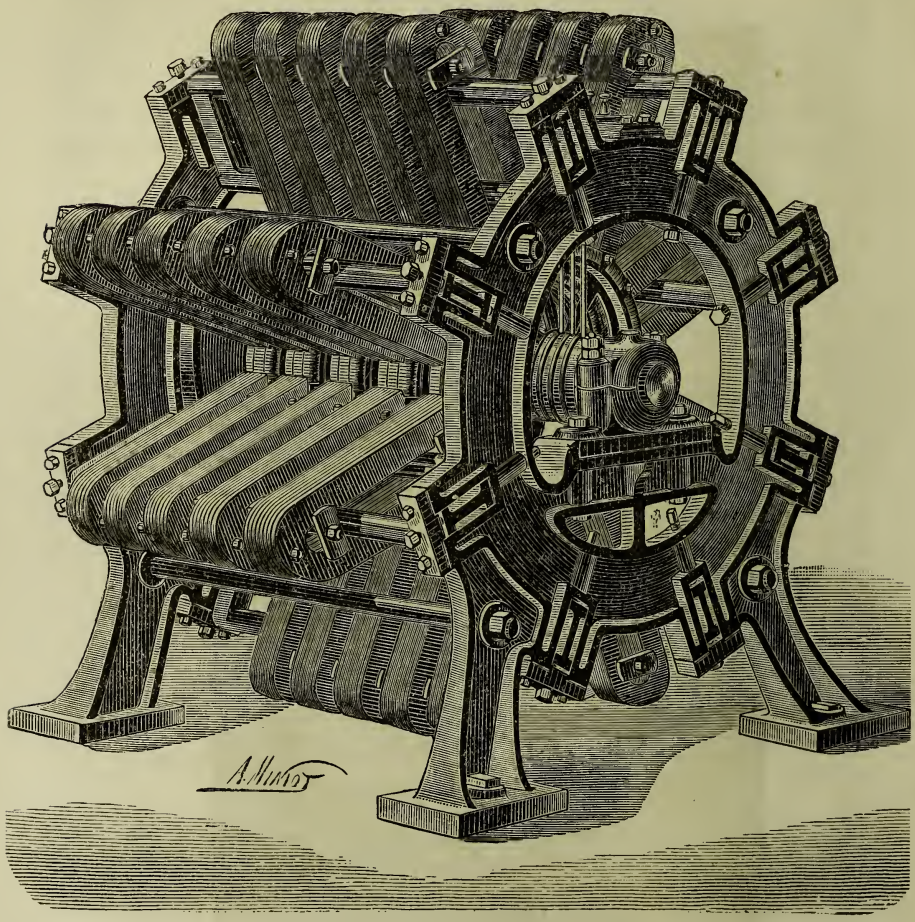


Fig. 363. — Machine magnéto-électrique (*Méritens*).

par les disques de bronze où on peut à volonté les réunir en série ou en batterie; l'un des pôles du courant total aboutit à l'arbre C l'autre à un manchon métallique D concentrique à l'arbre dont il est (fig. 361) séparé par un cylindre isolant : enfin deux frotteurs appuyant l'un R sur l'arbre, l'autre S sur ce manchon sont reliés aux

bornes de la machine où l'on fixe les extrémités du circuit extérieur F.

Les aimants sont constitués par des fers à cheval formés de six lames d'acier superposées : chaque faisceau pèse 20 kilogrammes environ et peut en porter 60.

Afin d'éviter l'échauffement qui se produit dans les noyaux quand ils sont pleins, échauffement dû à la production de courants énergiques qui prennent naissance dans ces noyaux (courants de Foucault), ceux-ci sont supprimés. La partie centrale de la bobine est constituée par un cylindre de fer creux et fendu le long d'une génératrice; deux disques annulaires de laiton fendus suivant un rayon sont fixés aux extrémités de ce cylindre; le fil isolé est enroulé sur le noyau ainsi constitué. Ce fil ne doit pas être trop fin ou bien on augmente la section en enroulant 4 ou 8 fils parallèlement.

La machine tourne à la vitesse d'environ 400 tours par minute; il y a 16 inversions par tour, soit 6400 par minute et plus de 100 par seconde.

Cette machine a été utilisée pour l'éclairage électrique et elle a été employée notamment pour l'éclairage des phares, à La Hève, etc.

486. Machines Méritens. — L'un des modèles construits par M. de Méritens présente des aimants en fer à cheval qui sont disposés sur un bâti comme ceux de la machine de l'Alliance; mais les bobines induites diffèrent de forme et de position: elles se déplacent circulairement dans le plan même des aimants qui agissent ainsi par bout et non latéralement; ces aimants sont d'ailleurs terminés par des pièces polaires qui sont entaillées de manière à laisser entre elles et les bobines le moindre espace possible.

Le système induit est constitué par une roue qui tourne dans le plan des aimants et sur la jante de laquelle sont disposées des bobines en nombre égal à celui des pôles. Ces bobines sont aplaties et légèrement cintrées de manière à s'appliquer sur la jante en formant une surface circulaire continue; deux bobines successives sont séparées par une lame de cuivre, et comme à un même instant elles sont nécessairement parcourues par des courants inverses elles sont réunies en série de manière que chaque extrémité d'une bobine soit reliée à l'extrémité opposée de la bobine voisine; il résulte de cette disposition que les actions des diverses bobines ainsi reliées sont concourantes. Les bobines d'un même anneau constituent ainsi un circuit dont les extrémités communiquent à des anneaux isolés montés sur l'axe et sur lesquels des frotteurs appuient pour relier ce circuit au circuit extérieur.

En réalité, chaque tranche de la machine, comprenant 8 aimants

et la roue munie de 16 bobines, constitue une machine fonctionnant distinctement et produisant des courants alternatifs : les diverses tranches, généralement au nombre de 5 agissent isolément et on peut combiner diversement les courants qu'elles fournissent soit pour animer des circuits distincts, soit pour établir le courant dans un seul circuit, en réunissant à volonté ces tranches en série ou en batterie.

M. de Méritens a donné d'autres formes à cette machine qui est caractérisée spécialement par la disposition des bobines induites; c'est ainsi que dans certains modèles les aimants en fer à cheval au lieu d'avoir la disposition rayonnée sont placés parallèlement de manière que leurs branches rectilignes constituent les génératrices d'un cylindre creux, les pôles étant alternés nécessairement. Il n'y a qu'un seul anneau induit tournant en face de la région polaire qui, pour chaque pôle est munie d'une pièce polaire entaillée de manière à diminuer autant que possible la distance des parties aimantées aux bobines.

Dans une autre machine dite d'*atelier*, la même disposition générale subsiste, mais les aimants en fer à cheval sont remplacés par des aimants rectilignes placés parallèlement de manière que les pôles soient alternés (fig. 364); les aimants sont constitués par des lames d'acier réunies en faisceaux. Les bobines induites tournent en face de la partie latérale des pôles.

Les fils des bobines sont reliés à des bornes constituant un commutateur qui permet de réunir à volonté les 16 bobines en série, ou de réunir en batterie 2 groupes de 8 bobines en série, ou 4 groupes de 4 bobines en série; cette disposition est désignée sous le nom de *plateau permutateur*.

487. — Les machines magnéto-électriques peuvent donner des courants redressés ou des courants alternatifs suivant les dispositions adoptées pour recueillir les courants ; nous citerons seulement deux types de machines à courants redressés en plus de la machine Gramme déjà décrite (356) : la machine Méritens et la machine Siemens.

Dans la machine de Méritens le champ magnétique est obtenu par des barreaux aimantés rectilignes disposés de manière à constituer un cylindre annulaire et réunis en quatre groupes dont les pôles sont alternés; les lignes de commutation sont donc au nombre de quatre. Un anneau tourne à l'intérieur de ces aimants et en face des régions polaires; il est constitué par seize bobines réunies sur la jante d'une roue, chaque bobine étant formée de quatre hélices dis-

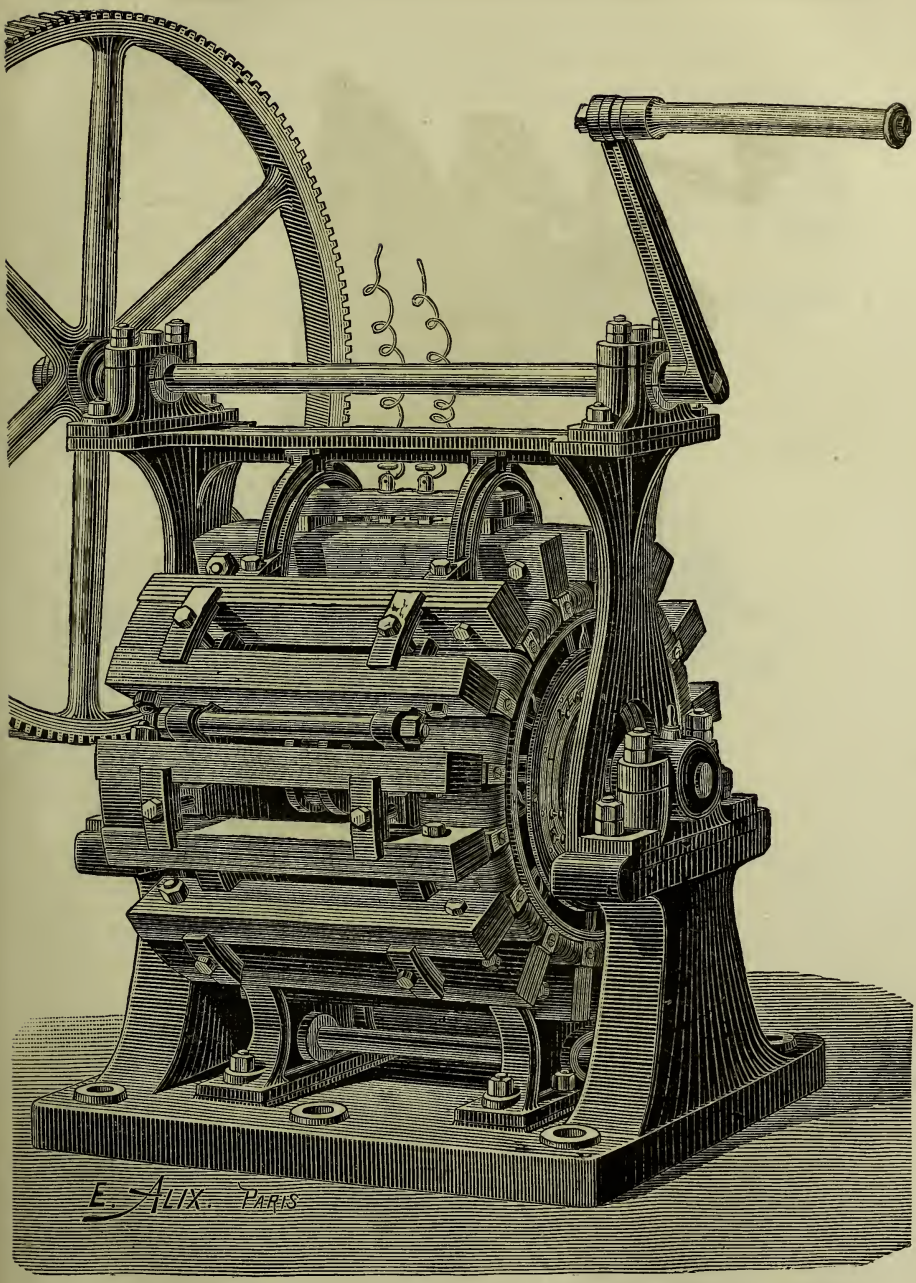


Fig. 364. — Machine magnétc-électrique (*Méritens*).

tinctes placées à la suite ; ces hélices sont réunies entre elles et aux soixante-quatre lames d'un collecteur de la même manière que les

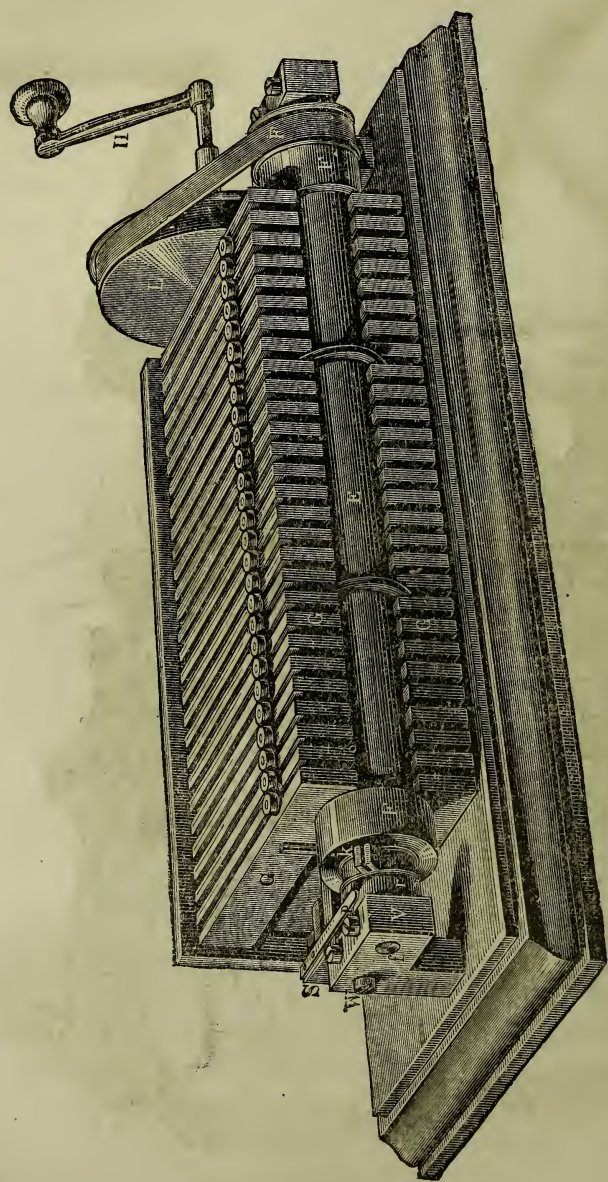


Fig. 3 5. — Machine magnéto-électrique Siemens. (*La Lumière électrique.*)

connexions sont établies dans la machine Gramme. Le courant est recueilli également par des balais, mais ces frotteurs sont au

nombre de quatre puisqu'il y a quatre lignes de commutation : ces quatre frotteurs peuvent être reliés de manière à envoyer le courant dans deux circuits distincts ou dans un seul circuit.

488. Machine Siemens. — Ce qui caractérise la machine Siemens, c'est l'induit dont la forme est très différente de celles que l'on rencontre dans les machines que nous avons décrites où l'élément induit était un circuit tournant autour d'un axe qui ne le rencontre pas; dans les machines Siemens cet élément est un circuit tournant autour d'un de ses diamètres, lequel est perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique.

La bobine des machines magnéto-électriques Siemens est constitué

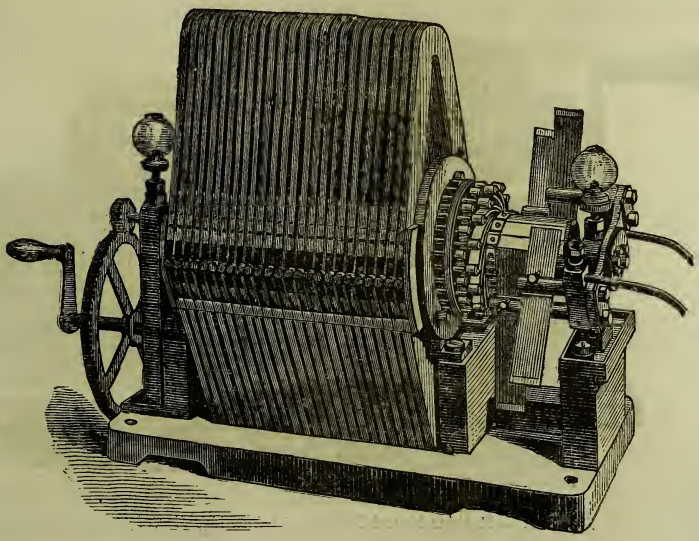


Fig. 366. — Machine magnéto-électrique Siemens.

par un cylindre E (fig. 365) dont l'âme est une pièce de fer doux dont la section a la forme d'un double T; le fil est enroulé un certain nombre de fois parallèlement à la longueur dans les parties creusées de cette pièce, de manière à donner une section circulaire; les diverses spires sont maintenues par des ligatures. On reconnaît aisément que les actions qui se produisent dans le fil des deux côtés de la bobine sont concordantes; les extrémités du fil sont reliés à un redresseur analogue à celui de la machine Clarke : le circuit extérieur qui se termine aux frotteurs de cet organe sera donc parcouru par un courant ayant constamment le même sens.

Cette bobine est placée entre les branches d'aimants en fer à cheval G munis ou non de pièces polaires creusées de manière à laisser exactement la place de la bobine; dans certains modèles la bobine présente une assez grande longueur et le champ magnétique est constitué par une série d'aimants, trente par exemple placés parallèlement.

Nous signalons sans insister un modèle destiné plus spécialement aux laboratoires dans lesquels les inducteurs sont des aimants en V réunis deux à deux par leurs pôles de même nom (fig. 366). L'induit est une bobine Siemens-Alteneck que nous décrivons ci-après. Ce type ne paraît pas s'être beaucoup répandu.

489. Machine Marcel Deprez. Machine Trouvé. — Bien que cette

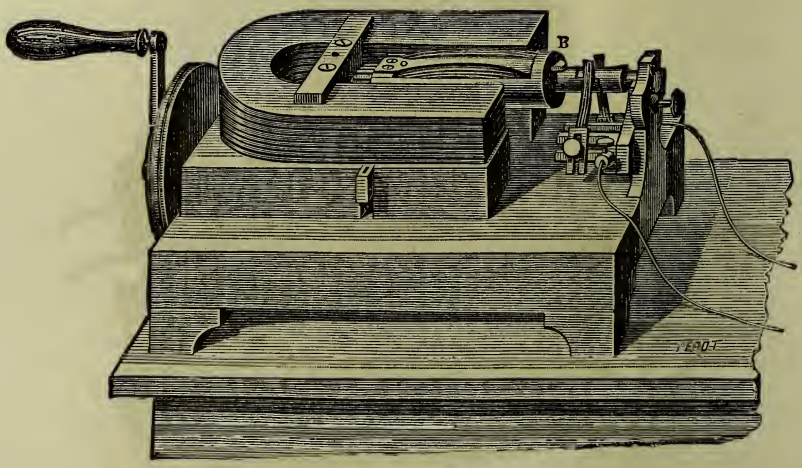


Fig. 367. — Machine Marcel Deprez. (*La Lumière électrique.*)

machine soit souvent employée comme moteur, elle peut servir à produire des courants d'induction.

C'est une machine magnéto-électrique (fig. 367) dont la bobine est du type des bobines Siemens.

L'inducteur est constitué par un aimant en U et la bobine est placée entre les branches de cet aimant.

Les extrémités du fil de la bobine aboutissent à un commutateur monté sur le même axe, tournant avec elle et permettant d'obtenir le redressement du courant. Celui-ci est recueilli par des balais qui appuient sur deux régions diamétralement opposées du commutateur.

Les balais ne doivent pas avoir la même position suivant que la machine doit transformer du travail mécanique en courant ou inversement. Aussi sont-ils montés sur une pièce mobile que l'on fixe à la position convenable, à l'aide d'une vis de pression.

Cette machine est le plus souvent employée comme moteur et peut rendre des services dans les laboratoires alors qu'il s'agit d'obtenir une puissance assez faible mais constante : elle peut être mise en mouvement par le courant d'une pile. Des poulies de divers diamètres montées sur l'axe de la bobine permettent, à l'aide d'une corde sans fin, de transmettre le mouvement de rotation à un arbre quelconque placé parallèlement à la bobine.

La machine Trouvé, qui sert aussi plus souvent comme moteur, présente d'une manière générale une disposition analogue : seulement le fer doux n'est pas limité latéralement par une surface

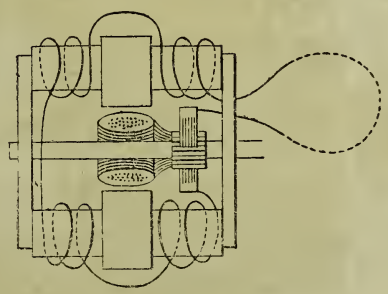


Fig. 368. — Principe de la machine Gramme.

cylindrique de révolution autour de l'axe, mais par une surface excentrée afin de prolonger les variations magnétiques lors du passage du fer doux devant les pôles.

490. Machines dynamo-électriques. Machine Gramme. — Tout en reconnaissant à M. Pacinotti le mérite de l'invention première des machines d'induction à courants continus, il faut reconnaître que le système qu'il avait construit est resté ignoré et sans application, et que c'est l'anneau de la machine Gramme qui a servi de modèle à de nombreux systèmes de machines d'induction.

Nous avons déjà décrit cet anneau, composé d'un noyau de fil de fer doux présentant la forme annulaire et autour duquel est enroulé un fil isolé qui recouvre tout le noyau mais qui est divisé en sections distinctes : les fils de deux sections voisines sont réunis ensemble d'une part, ce qui assure la continuité du circuit, mais de plus les points de jonction de ces divers fils sont reliés à autant de

lames métalliques fixées dans un cylindre isolant et constituant le *collecteur* sur la surface duquel s'appuient deux balais.

Par la rotation de l'anneau autour autour de son axe dans un champ magnétique, des courants induits prendront naissance dans le fil qui entoure l'anneau, ces courants étant de sens contraire de part et d'autre de chaque ligne de commutation; on sait que, si les balais s'appuient sur les collecteurs au niveau de ces lignes ou plutôt à quelque distance, comme nous l'avons dit (483), le fil qui réunira les balais sera traversé par un courant de sens invariable. Nous avons décrit une machine magnéto-électrique basée sur ce

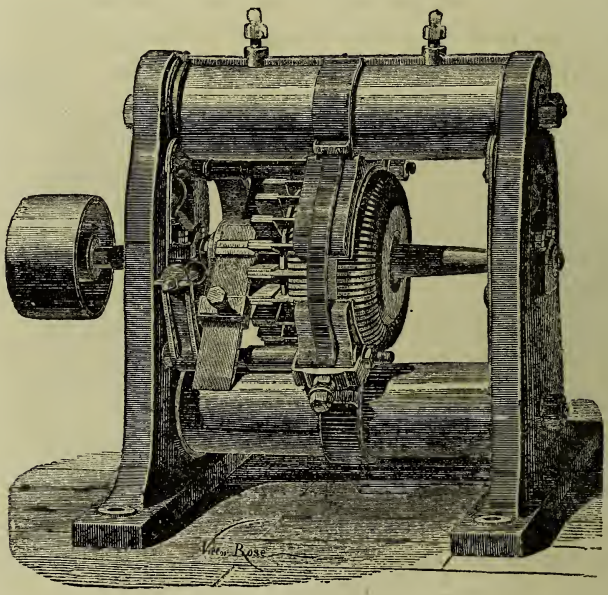


Fig. 369. — Machine Gramme, type normal.

principe, il nous reste à signaler les appareils dynamo-électriques qui ont le même point de départ.

Le type dit *machine A* est un des plus employés; il n'y a rien de particulier à dire sur l'anneau ni sur les balais frotteurs : le champ magnétique est obtenu par l'emploi de deux bobines rectilignes horizontales (fig. 368, 369, 370) reliées à leurs extrémités par les pièces du bâti en fer et en fonte qui constituent les culasses deux électro-aimants : chaque bobine est composée, en effet, de deux parties sur lesquelles l'enroulement du fil a lieu en sens inverse de manière à faire naître au milieu un point conséquent : les deux

points conséquents sont de polarité opposée, de telle sorte que l'ensemble est le même que si l'on avait deux électro-aimants ordinaires à deux branches placés en face l'un de l'autre et réunis par les pôles de même nom. Chacun de ces pôles conséquents est muni d'une pièce polaire s'élargissant en forme de demi-cylindre ils constituent ensemble une cavité dans laquelle tourne l'anneau dont l'axe

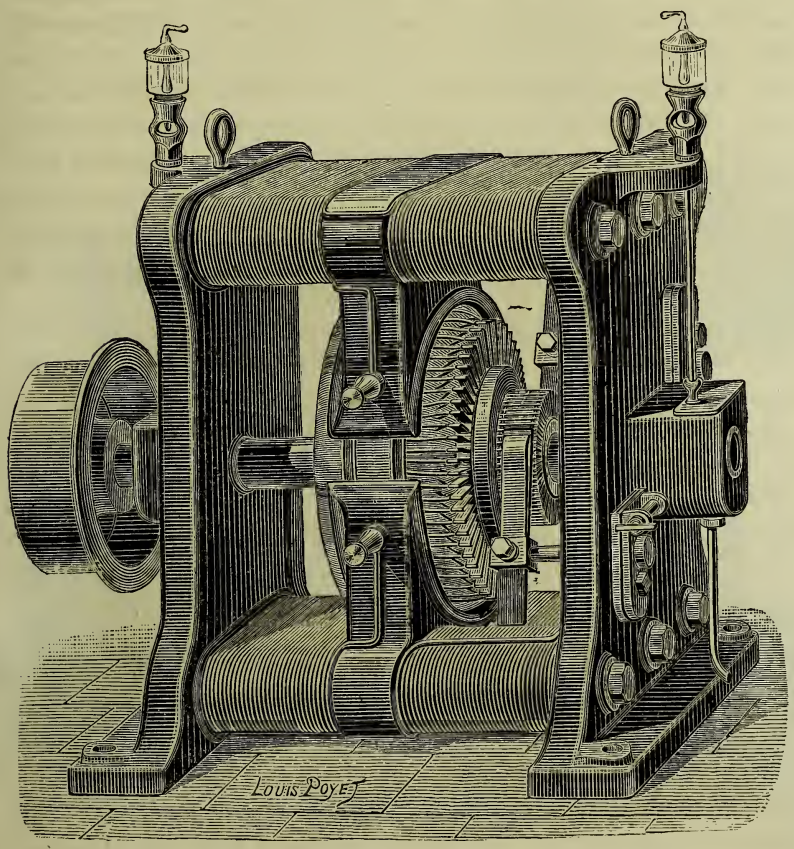


Fig. 370. — Machine Gramme à électro-aimant plat.

est porté par des coussinets maintenus dans les flasques du bâti (fig. 369 et 370).

Les conducteurs qui entourent les électro-aimants sont placés dans le circuit même du courant : les fils des bobines et de l'anneau ont des dimensions variables, suivant l'usage auquel la machine est destinée.

Dans un autre modèle, la carcasse en fonte forme une sorte de

cadre dans lequel sont placés verticalement l'un au-dessus de l'autre deux électro-aimants rectilignes dont les extrémités en regard qui constituent des pôles de nom contraire sont munies de pièces polaires épanouies entre lesquelles, comme précédemment, tourne l'anneau qui présente la disposition ordinaire.

La machine dite type de 1885 présente une disposition analogue avec deux ou quatre électro-aimants, la forme est très ramassée, très rustique; les noyaux des électro-aimants sont venus de fonte avec le bâti.

La machine octogonale présente une disposition générale analogue : il y a huit électro-aimants à noyaux de fer doux fixés au bâti par une extrémité, deux pièces voisines ayant des polarités différentes ; il y a dès lors quatre lignes de commutation. L'anneau et le collecteur ne présentent rien de spécial, il y a nécessairement quatre balais. Cette machine, ainsi que la suivante, est plus spécialement employée pour les applications mécaniques.

La machine dite *cylindrique* est formée de deux flasques circulaires, l'une pleine en fonte, l'autre annulaire en bronze entre lesquelles sont fixées deux électro-aimants ayant une section droite demi-circulaire et qui placés à côté l'un de l'autre donnent à l'appareil la forme cylindrique ; l'axe de rotation est parallèle aux électro-aimants et l'anneau tourne dans l'espace laissé libre à l'extrémité polaire, c'est-à-dire dans le vide de la flasque de bronze.

Dans un nouveau modèle dit à type supérieur, les inducteurs massifs sont à la partie inférieure et sont terminés supérieurement par deux longues pièces polaires laissant entre elles un espace cylindrique dans lequel tourne l'anneau qui, plus large que dans les modèles primitifs, se rapproche de la forme d'une bobine (fig. 371).

Enfin, dans un modèle à grand débit, M. Gramme emploie des séries de couples d'électro-aimants analogues à ceux de la machine d'atelier, mais placés verticalement; les extrémités d'un même côté sont réunies par un plateau de fonte : on réunit ainsi 3, 4, et jusqu'à 7 couples d'électro-aimants que l'on place parallèlement. L'anneau subit ici une modification importante : il doit en effet s'allonger notablement : le circuit induit est constitué non par un fil, mais par une série de lames de cuivre isolées les unes des autres, placées intérieurement et extérieurement au noyau de fil de fer qui a la forme d'un cylindre annulaire très allongé ; chaque lame intérieure est reliée à ses deux extrémités à la lame extérieure correspondante et se prolonge au delà pour former directement le collecteur ; il y a quatre balais, deux à chaque extrémité.

Les électro-aimants sont montés en dérivation sur l'armature.

La résistance intérieure de l'induit est de $0^{ohm},008$ et à la vitesse de 1000 tours par minute la machine pourra fournir un courant de 280 ampères avec une différence de potentiel de 100 volts,

491. Machine Siemens. — Les machines Siemens à bobine à double T donnent bien des courants redressés, mais qui ne peuvent être considérés comme continus; pour obtenir cette propriété, il faut multiplier les parties élémentaires qui, prises isolément, sont susceptibles de donner un courant; chaque courant élementaire

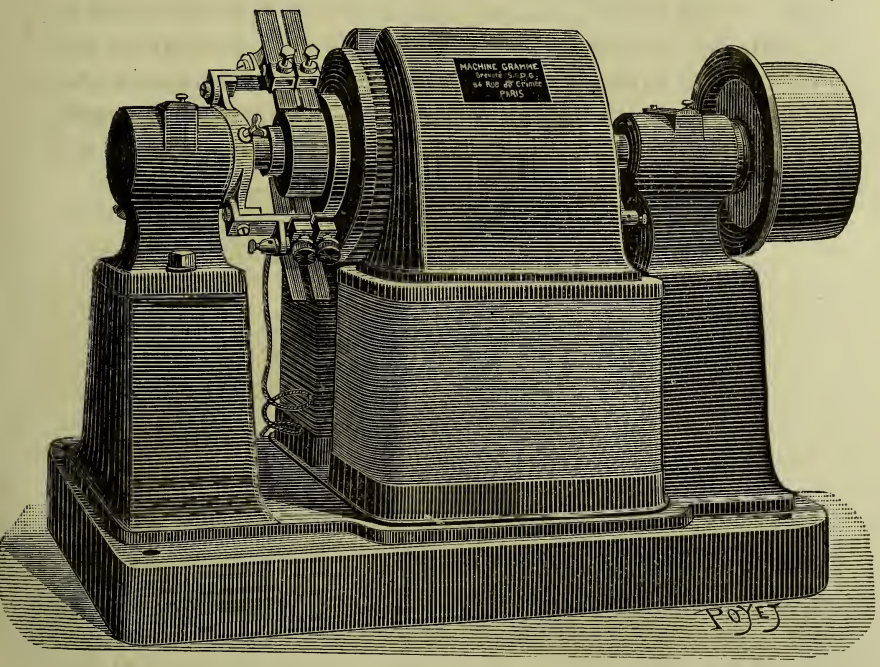


Fig. 371. — Machine Gramme, type supérieur.

commence à son tour, passe par un maximum, puis décroît et on réunit à chaque instant un certain nombre de ces courants élémentaires qui se trouvent en des phases différentes; la résultante de leurs actions s'approchera d'autant plus de la constance que le nombre des actions sera plus plus grand.

Imaginons un cylindre à la surface duquel sont tendus un certain nombre de fils de cuivre également distants; il est possible de les réunir entre eux deux à deux et avec un collecteur du genre du collecteur de la machine Gramme, de manière à produire cette addition

de courants élémentaires. Il existe plusieurs solutions du problème : le type employé actuellement dans les bobines Siemens a été combiné par M. von Hefner Alteneck ; la question a été étudiée en détail par M. A. Bréguet.

Les lignes de commutation qui sont au nombre de deux dans les appareils Siemens (soit *un* diamètre de commutation) divisent l'espace en deux parties telles que, par suite de la rotation, tous les conducteurs qui sont d'un même côté de ce diamètre sont parcourus par des courants de même sens et que tous les conducteurs qui sont de l'autre côté sont parcourus par des courants dans un sens contraire ; il faut relier ces conducteurs deux à deux de telle sorte que les effets soit concordants dans toutes les parties du circuit ainsi constitué, par rapport au circuit extérieur. Le problème est absolument analogue à la question générale que nous avons traitée (464), en remplaçant seulement les bobines par des fils rectilignes et le

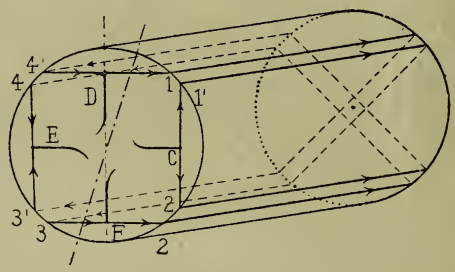


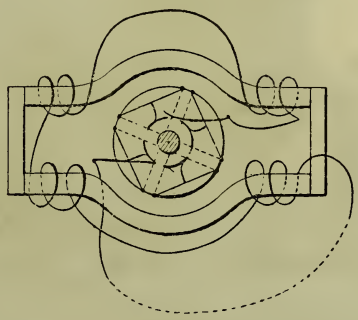
Fig. 372.

sens du courant autour de la bobine par le sens du courant compté parallèlement à l'axe (fig. 372) ; aussi la solution est la même et il suffit d'établir entre les diverses génératrices des connexions analogues à celles indiquées sur la figure ; ces connexions s'établissent tantôt à l'une et tantôt à l'autre base du cylindre, ou plutôt, en réalité, on enroule un fil suivant le tracé déterminé à l'avance. Les communications avec le circuit extérieur se font à l'aide d'un collecteur et de frotteurs tout à fait semblables à ceux que nous avons décrits pour la machine Gramme.

Dans cette bobine induite les fils placés le long du cylindre sont tous actifs et il n'y a que les parties qui établissent les liaisons sur les deux bases qui ne sont pas le siège d'une force électro-motrice due à l'induction ; à cet égard, la partie utile des fils est en plus grande proportion que dans l'anneau de la machine Gramme où les fils qui sont à l'intérieur de l'anneau sont sans action.

Dans les bobines des machines Siemens, le plus souvent chacune des parties que nous avons supposée être constituée par un seul fil est constituée par plusieurs tours successifs du même fil; dans d'autres cas où on cherche à diminuer la résistance de l'induit on établit parallèlement plusieurs fils que l'on réunit à leurs extrémités pour former un conducteur unique. Enfin dans quelques cas les fils sont remplacés par de véritables barres de cuivre placées à côté l'une de l'autre, mais séparées par un certain intervalle, ce qui assure une ventilation énergique et s'oppose à l'échauffement.

Les machines Siemens qui se présentent sous des formes très variées comme détail se rapportent à deux grands types : machines à inducteurs horizontaux, machines à inducteurs verticaux. Les inducteurs ont le plus souvent une forme caractéristique (fig. 373 et 374); ils sont constitués par une série de barreaux de fer forgé à sections



Fig, 373. — Principe de la machine dynamo-électrique de Siemens.

rectangulaires et cintrés en leur milieu ; ces barreaux sont placés à côté les uns des autres, et la partie rectiligne à chaque extrémité est recouverte par la bobine inductrice ; l'enroulement est tel qu'il se produit un point conséquent sur la partie cintrée. Deux électro-aimants semblables sont placés parallèlements en regard de manière que les points conséquents sont de polarité opposée ; la bobine tourne dans la partie cylindrique existant entre les parties cintrées en regard.

Dans certains modèles récents, la forme des électro-aimants a été modifiée, les noyaux des électro-aimants ont un poids relativement plus considérable : mais les pièces polaires n'ont pas subi un accroissement correspondant.

La répartition du courant entre les inducteurs et le circuit extérieur a varié suivant les modèles et ne présente encore rien de fixe ;

dans les dernières machines construites, les communications des diverses parties ne sont pas établies d'une manière définitive et on peut coupler à volonté les divers éléments suivant le travail que la machine a à effectuer.

493. Machine Edison. — Les machines Edison se rattachent à la disposition générale des machines Siemens; dans un des types les plus répandus il y a deux bobines verticales de grande longueur réunies à leur partie supérieure par une culasse massive, les pôles situés à l'extrémité inférieure sont munis de pièces polaires entre lesquelles tourne la bobine induite. Dans quelques modèles il y a plusieurs rangées parallèles de bobines, ce qui oblige à allonger la

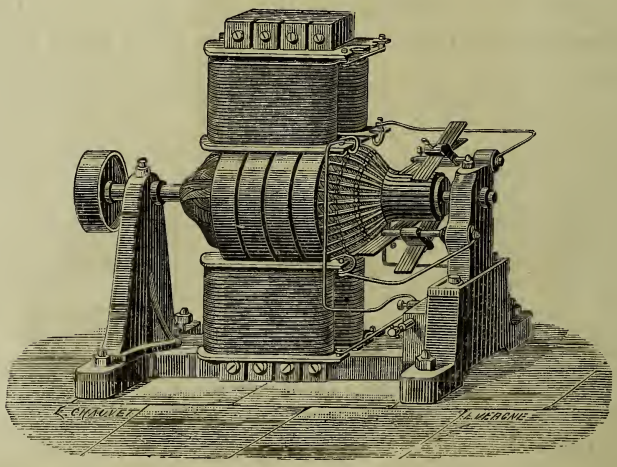


Fig. 374. — Machine dynamo-électrique Siemens.

bobine induite; quelquefois les électro-aimants ont été placés horizontalement.

Une disposition plus récente qui constitue la machine Edison-Hopkinson supprime les électro-aimants multiples, les courants passant dans les parties voisines de deux bobines consécutives ont l'inconvénient de se contrarier dans leurs effets; cet inconvénient disparaît par l'emploi d'une bobine unique pour chaque branche de l'électro-aimant cette bobine ayant une section rectangulaire de grandes dimensions; les fils qui recouvrent les bobines sont de section carrée; grâce à cette forme, dans un espace donné on peut en introduire une plus grande quantité (fig. 375).

Ce qui caractérise essentiellement les machines Edison, c'est la

bobine induite : elle repose sur le même principe général que la bobine Siemens dont elle diffère cependant dans la construction.

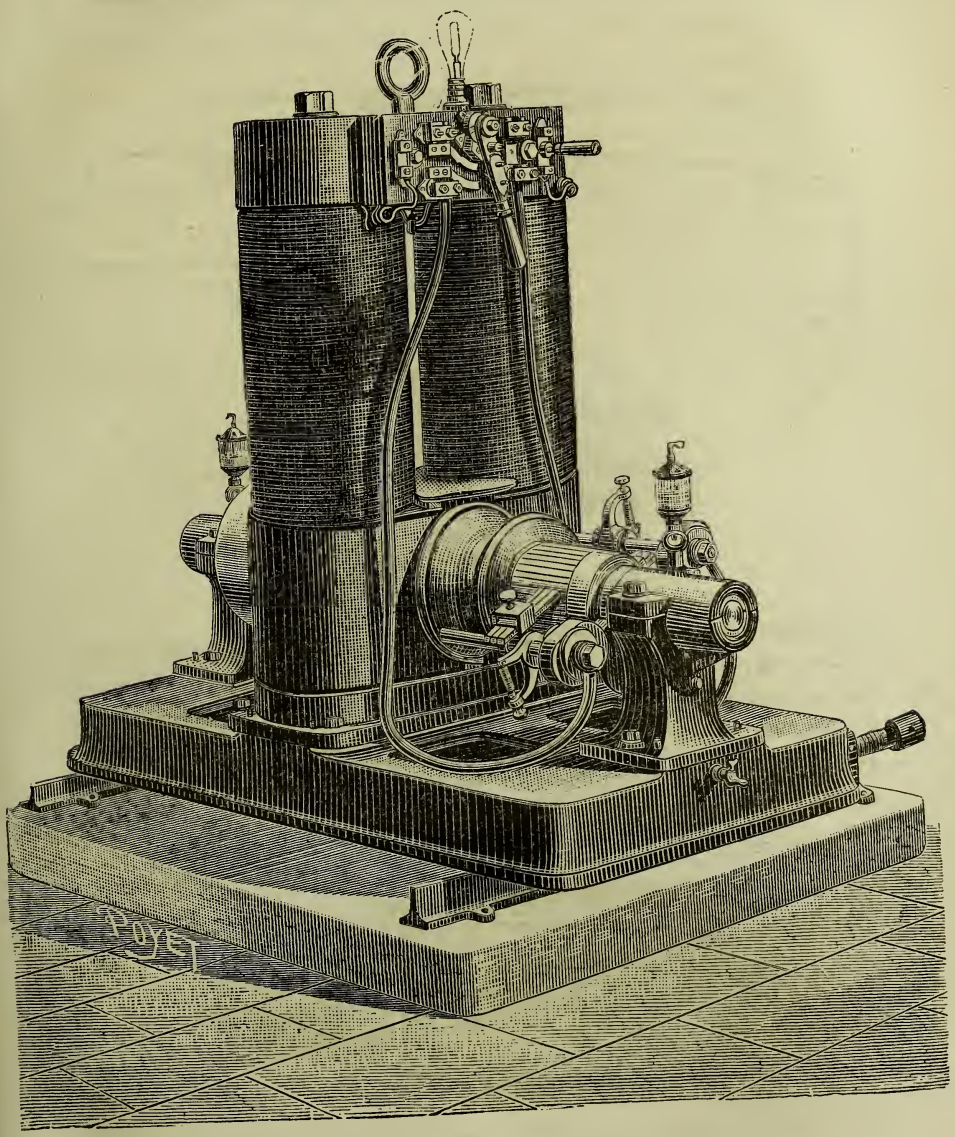


Fig. 375. — Machine Edison-Hopkinson.

Les parties actives sont aussi les génératrices d'un cylindre réunies entre elles de manière à former un circuit continu possédant les pro-

priétés générales que nous avons indiquées. Mais d'une part ces génératrices sont, non des fils, mais des barres métalliques, et, d'autre part, leur groupement n'est pas fait suivant la même loi;

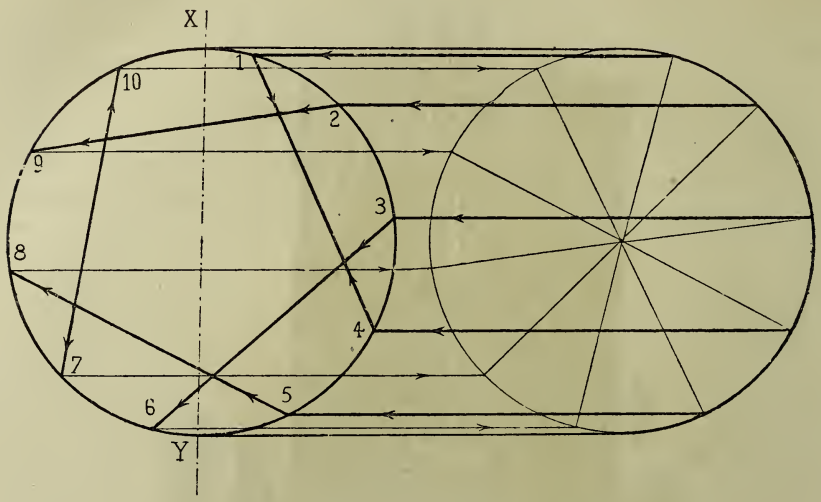


Fig. 376. — Principe des bobines Edison.

notamment le nombre de couples de génératrices est impair au lieu d'être pair, par exemple il y a dix ou quatorze génératrices, ce qui correspond à cinq ou sept lames au collecteur; les connexions sont établies entre les génératrices conformément au type I que nous avons décrit plus haut (fig. 376). Le nombre effectif des génératrices est très grand, en général; dans un modèle, il était de 98.

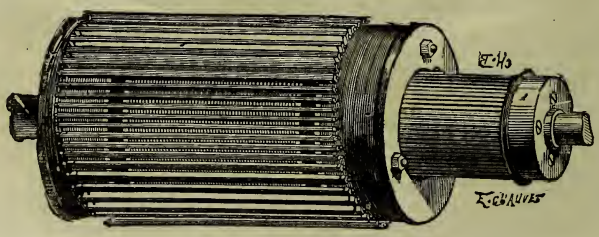


Fig. 376 bis. — Bobine Edison.

Les connexions entre les génératrices diverses se font aussi d'une manière spéciale: il y a à chaque extrémité de la bobine des disques métalliques isolés les uns des autres et en nombre égal à celui des

couples de génératrices. Chaque disque porte sur son bord deux saillies sur lesquelles viennent s'appuyer les extrémités des deux génératrices correspondantes qui sont ainsi reliées par le disque; la position de ces saillies a été déterminée à l'avance d'après le groupement choisi pour ces génératrices. A l'une des extrémités les

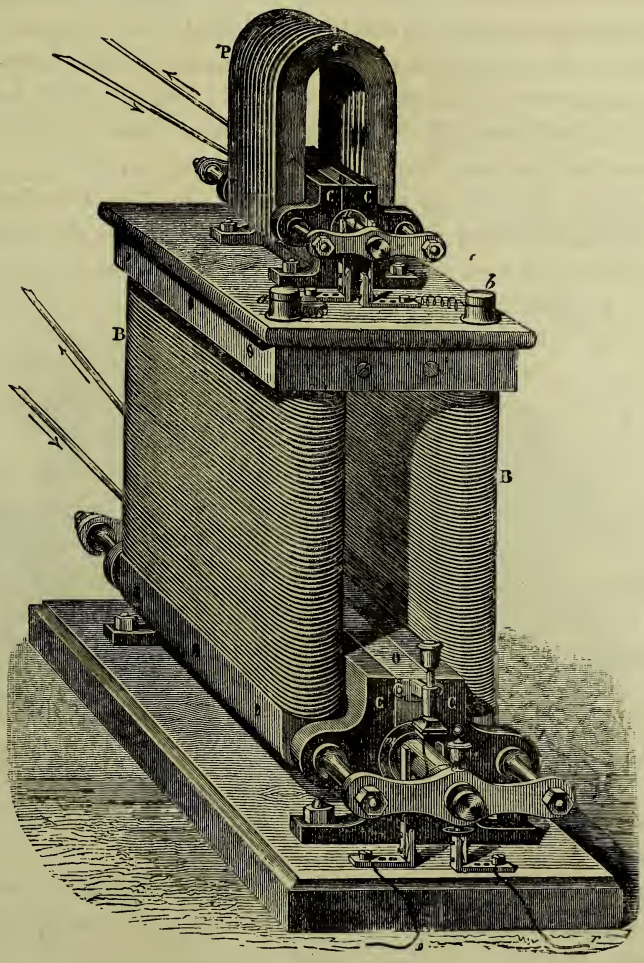


Fig. 377. — Machine Wilde. (*La Lumière électrique.*)

génératrices se prolongent et constituent les lames du collecteur.

493. Machines a excitatrices. Machines Wilde et Ladd. — Comme nous l'avons indiqué d'une manière générale, le champ magnétique dans lequel se déplace l'induit peut être produit par des électro-aimants animés par une machine spéciale, une *excitatrice;* cette

excitatrice peut être elle-même une machine magnéto-électrique ou une machine dynamo-électrique.

Comme modèle du premier type nous indiquerons la machine de Wilde (1867) dans laquelle pour la première fois le champ magnétique fut produit par un électro-aimant (fig. 377).

L'excitatrice était une machine Siemens magnéto-électrique ; elle était placée au-dessus de la machine principale qui était plus grande, et avait une disposition analogue, sauf que les aimants étaient remplacés par des électro-aimants dans les fils desquels était envoyé le courant produit dans la bobine de l'excitatrice, courant redressé par la disposition que nous avons indiquée précédemment.

La bobine qui tourne entre les pôles de l'électro-aimant est semblable absolument à celle de l'excitatrice mais de dimensions plus grandes; son mouvement de rotation est plus rapide. Le courant qui y est produit est recueilli et envoyé dans le circuit extérieur à l'aide d'un redresseur analogue à celui de l'excitatrice; si l'on voulait des courants alternatifs, il suffirait de terminer le fil de cette bobine à deux bagues métalliques isolées sur lesquelles appuieraient des frotteurs.

Le premier modèle de machine dans lequel l'excitatrice était une machine dynamo-électrique est dû à Ladd (1867). Cet appareil comprend deux électro-aimants rectilignes B à section très aplatie, placés parallèlement de manière que les pôles de noms contraires sont en regard (fig. 378). Les noyaux sont munis de pièces polaires à leurs deux extrémités, pièces polaires creusées de cavités demi-cylindriques dans lesquelles tournent des bobines Siemens de dimensions différentes; l'une des bobines est reliée au circuit des électro-aimants qui sont aimantés par le passage du courant qu'elle envoie et qui est redressé; les fils de l'autre bobine sont reliés à un redresseur dont les frotteurs aboutissent à des bornes où l'on fixe les extrémités du circuit extérieur.

Cette disposition a été modifiée à plusieurs reprises, il n'y a pas lieu d'insister, les modèles n'ayant jamais reçu des applications étendues.

M. Gramme a construit des machines à excitatrice, elles se composaient de plusieurs couples d'électro-aimants à chacun desquels correspondait un anneau ; le courant produit par l'un d'eux servait seulement à exciter les électro-aimants, les autres anneaux fournissaient le courant au circuit extérieur.

494. Machines a courants alternatifs. Machines Wilde, Siemens. — Parmi les machines à courant alternatif, quelques-unes, celles de

Wilde, de Siemens, de Gordon présentent une certaine analogie avec la machine de l'Alliance; des bobines sont fixées parallèlement à l'axe de rotation à la périphérie d'un plateau perpendiculaire à cet axe et tournant entre deux rangées circulaires de bobines montées sur des flasques fixes.

Dans la machine de Wilde et dans celle de Siemens les bobines fixes sont les inducteurs; l'enroulement y est tel que les pôles voisins et opposés sont de noms contraires, le nombre des bobines mobiles est égal à celui des bobines fixes; pour que les actions qui se produisent au même instant dans toutes les bobines mobiles soient con-

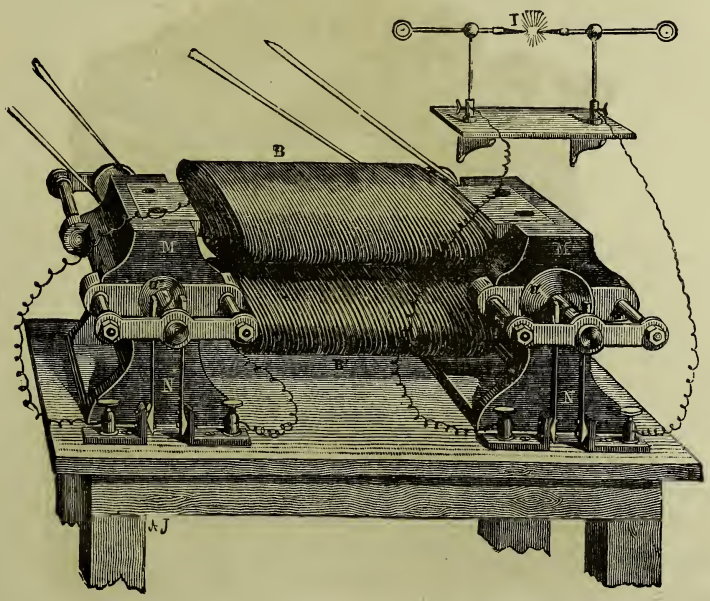


Fig. 378. — Machine Ladd. (*La Lumière électrique.*)

courantes, l'enroulement du fil change de sens d'une bobine à l'autre, le fil forme un circuit dans lequel agissent à chaque instant des forces électro-motrices alternant de sens. Les extrémités de ce circuit sont reliées à des bagues métalliques isolées portées par l'axe de rotation et contre lesquelles appuient des frotteurs à ressort où viennent s'attacher les extrémités du circuit extérieur.

Dans la machine de Siemens (fig. 379), les électro-aimants inducteurs sont animés par le courant produit par une excitatrice à courant continu. Dans la machine de Wilde, qui n'est plus employée d'ailleurs, une partie des bobines mobiles formait un circuit spécial

qui aboutissait sur l'axe de rotation à un commutateur redresseur et le courant qu'elles produisaient ainsi était dirigé dans les électro-aimants inducteurs. C'était à proprement parler une machine auto-excitatrice.

Les bobines induite de la machine Siemens n'ont pas de noyaux en fer pour éviter l'échauffement ou au moins pour le diminuer.

495. Machines Ferranti, Gordon. — La machine Ferranti ne diffère de la machine Siemens au fond que parce que les bobines

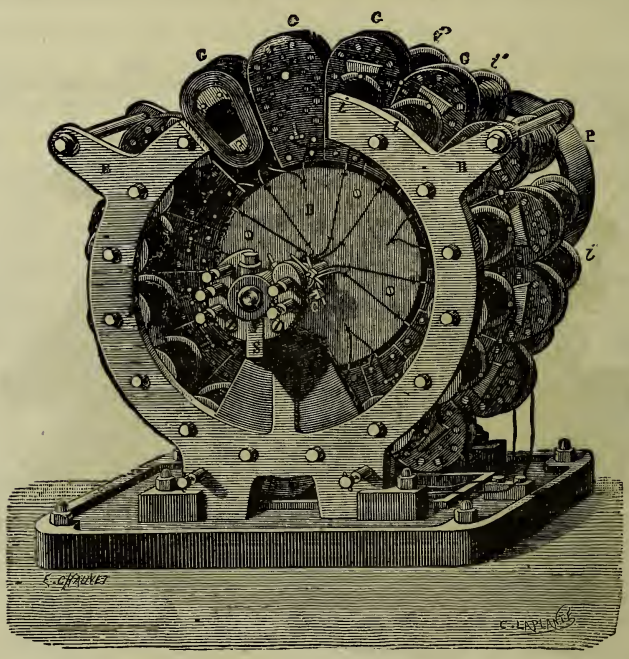


Fig. 379. — Machine Siemens à courants alternatifs. (*La Lumière électrique.*)

induites à enroulement contraire sont remplacées par un circuit sinueux (fig. 380) ; l'action générale est la même d'ailleurs.

Dans la machine Gordon le système des induits est fixe et le système des inducteurs est mobile; le nombre des bobines induites est double de celui des inducteurs ; pour diminuer l'action latérale des bobines voisines, les bobines induites sont réunies en deux circuits comprenant l'un toutes les bobines du rang pair, l'autre toutes les bobines de rang impair.

Ajoutons que le modèle qui a été construit avec beaucoup de soin

dans les dispositions des diverses parties pour éviter les actions nuisibles est de très grandes dimensions.

496. Machine Lontin. — La machine Lontin mérite d'être signalée à cause de la disposition rayonnée que présentent les bobines.

Les bobines inductrices sont fixés radialement sur un axe horizontal, elles reçoivent un courant continu fourni par une excitatrice quelconque: leur pôles voisins sont alternés. Les bobines induites sont fixées radialement aussi à l'intérieur d'un bâti circulaire fixe entourant la partie mobile.

Le courant inducteur est amené aux bobines mobiles par un dispositif analogue au collecteur des machines Gramme, l'effet étant

Fig. 380. — Détails de la machine Ferranti. (*La Lumière électrique.*)

évidemment le même. Quant aux bobines induites on peut les réunir à volonté en un ou en plusieurs circuits distincts.

497. Machine Gramme a courants alternatifs. — La machine Gramme à courants alternatifs comprend un anneau analogue à ceux que nous avons déjà décrits, mais fixe et de grandes dimensions; les inducteurs sont des bobines fixées radialement sur l'axe de rotation et tournant à l'intérieur de l'anneau : elles sont terminées dans le voisinage de l'anneau par des pièces polaires épanouies et les fils qui les recouvrent sont reliés de telle sorte que lorsqu'ils sont parcourus par un courant les pièces voisines ont des pôles de nom contraire; le passage successif des divers inducteurs produit donc dans chaque section de l'anneau des courants alternés.

Les diverses sections de l'anneau constituent autant de groupes qu'il y a d'inducteurs, les sections correspondantes des divers groupes sont donc à chaque instant placées de la même façon par rapport aux inducteurs voisins ; on peut alors réunir en un même circuit

toutes ces sections correspondantes en établissant les communication, pour que les actions soient concordantes; il sera loisible d'utiliser l'action de chacun de ces groupes pour actionner un cir-

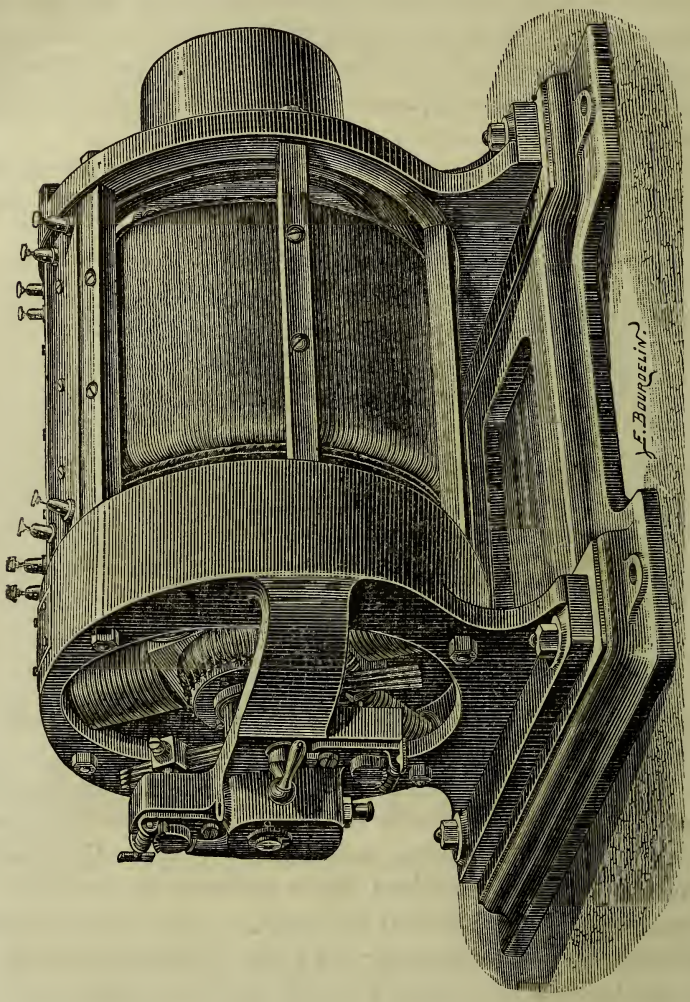


Fig. 381. — Machine Gramme à courants alternatifs.

cuit particulier ou de réunir leur action en les assemblant en série ou parallèlement.

Les électro-aimants inducteurs sont animés par le courant d'une machine excitatrice à courant continu dont les pôles sont reliés à des frottoirs appuyant sur deux couronnes métalliques isolées montées sur l'axe de rotation et reliées respectivement aux deux

extrémités du circuit que forment les fils entourant les inducteurs.

M. Gramme a construit un modèle dit machine auto-excitatrice à courants alternatifs qui comprend les mêmes éléments essentiels : une machine excitatrice et une machine génératrice. Ici la machine excitatrice est constituée par un anneau Gramme ordinaire tournant entre quatre électro-aimants inducteurs placés radialement à angle droit (fig. 381) : la machine génératrice est analogue à la machine Gramme à courants alternatifs ; l'anneau de l'excitatrice est monté sur le même arbre que les inducteurs de la génératrice, ce qui simplifie la transmission. Le courant fourni par l'anneau de l'excitatrice est envoyé dans les inducteurs, mais entre ces deux organes

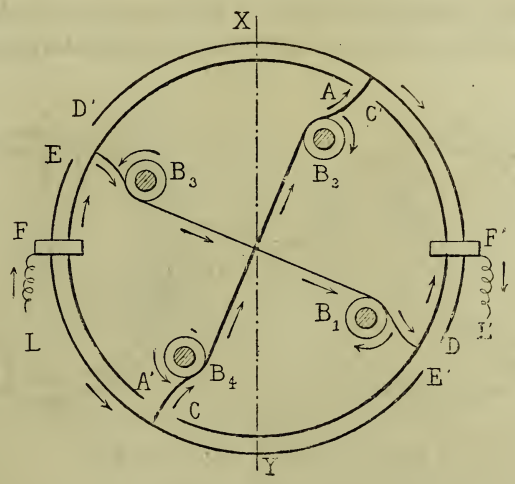


Fig. 382.

il traverse une résistance que l'on peut faire varier et qui sert à obtenir le réglage du courant.

498. Machine Brush. — La machine Brush ne rentre pas dans les types que nous avons indiqué précédemment : sous la forme sous laquelle on la rencontre ordinairement on peut dire que c'est une machine composée de plusieurs machines simples convenablement accouplées. Étudions d'abord une de ces machines simples (fig. 382) ; elle est en réalité constituée par la réunion des deux machines Clarke à courants redressés, calées à angle droit sur le même axe, de telle sorte qu'il y a deux paires de bobines B_1 B_3, B_2 B_4 et deux redresseurs, mais, et c'est là l'originalité du système, il n'y a que deux frottoirs F et F', chaque frottoir étant disposé de manière à

appuyer à la fois sur les deux redresseurs. Une autre différence qui ne change rien d'ailleurs au fonctionnement de la machine c'est que le champ magnétique est produit non par un aimant permanent, mais par un électro-aimant qui est monté en série avec le circuit extérieur, c'est-à-dire que le courant partant d'un frottoir traverse les électro-aimants, puis le circuit extérieur pour revenir à l'autre frottoir.

On comprend aisément le fonctionnement de l'appareil puisque le circuit est traversé par un courant résultant de l'action simultanée de deux machines de Clarke ; il n'y a d'ailleurs jamais interruption dans le courant puisque quand les frottoirs se trouvent sur la partie non conductrice de l'un des redresseurs, ils appuient sur les parties métalliques de l'autre redresseur ; à cet instant, l'une des paires de bobines passe au diamètre de commutation et se trouve

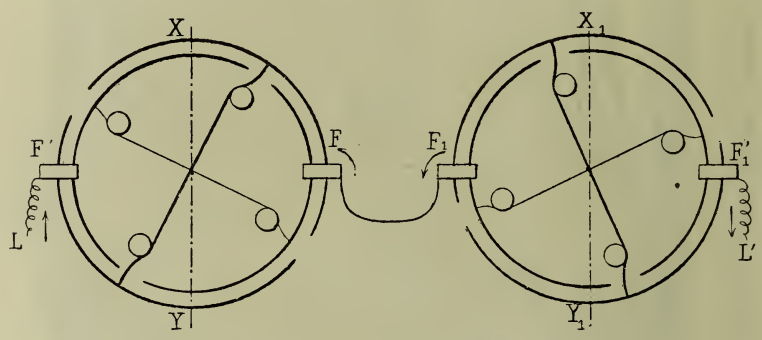


Fig. 383. — Principe de la machine Brush.

alors mise hors circuit, mais l'autre se trouve dans la région où l'action est maxima et envoie le courant dans le circuit extérieur. Pour les autres positions, les deux paires de bobines agissent ensemble comme montées parallèlement (ou en quantité).

Concevons maintenant deux machines identiques (fig. 383) montées en série avec le circuit extérieur et tournant de telle façon que lorsque dans la première une paire de bobines passera au diamètre de commutation, les bobines de l'autre seront inclinées de 45° sur ce diamètre. On voit immédiatement que pour une position quelconque les quatre paires de bobines produisent des effets concordants, mais que chaque fois qu'une paire de bobines passe au diamètre de commutation, elle est, pour un instant, mise hors circuit, le courant continuant à être produit par l'action simultanée des trois autres.

En réalité, les deux machines sont rassemblées, il existe dans un même plan quatre paires de bobines à 45° de distance les unes des autres tournant autour du même axe et dans un champ magnétique produit par le même électro-aimant (figs. 384 et 385); mais il existe effectivement deux redresseurs distincts dont chacun est double et est relié aux bobines comme il le serait si les machines étaient entièrement distinctes; les deux commutateurs sont reliés entre eux d'une part et, d'autre part, avec le circuit extérieur comprenant l'électro-aimant de la même façon que l'indique la figure schématique (fig. 384).

On conçoit qu'il serait possible de coupler un plus grand nombre de machines élémentaires, trois par exemple, en les réunissant également sur le même axe; les bobines seraient alors distantes de 30° les unes des autres, les six couples seraient en action concor-

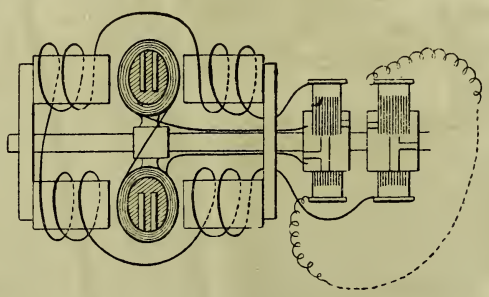


Fig. 384. — Principe de la machine Brush.

dante pour une position quelconque, mais il y en aurait seulement cinq quand un des couples passerait au diamètre de commutation. On pourrait même augmenter le nombre au delà de douze bobines, mais il n'a pas été dépassé en réalité.

La machine Brush se compose d'un anneau de fonte sur lequel est enroulé le fil qui constitue, suivant les cas, 8 ou 12 bobines distinctes : cet anneau mobile autour d'un axe horizontal tourne entre les pôles de deux électro-aimants placés en regard, les pôles étant alternés pour produire des effets concourants sur la bobine passant entre eux.

Il existe sur l'axe 4 ou 6 commutateurs redresseurs (suivant qu'il y a 8 ou 12 bobines) groupés de manière à former 2 ou 3 couples sur chacun desquels deux balais frottent sur toute la largeur. Dans le but d'éviter les variations brusques de résistance au contact des balais, les commutateurs présentent une disposition spéciale, mais

qui ne change rien à l'explication que nous avons donnée de leur fonctionnement. Chaque bobine est reliée d'une part à la bobine

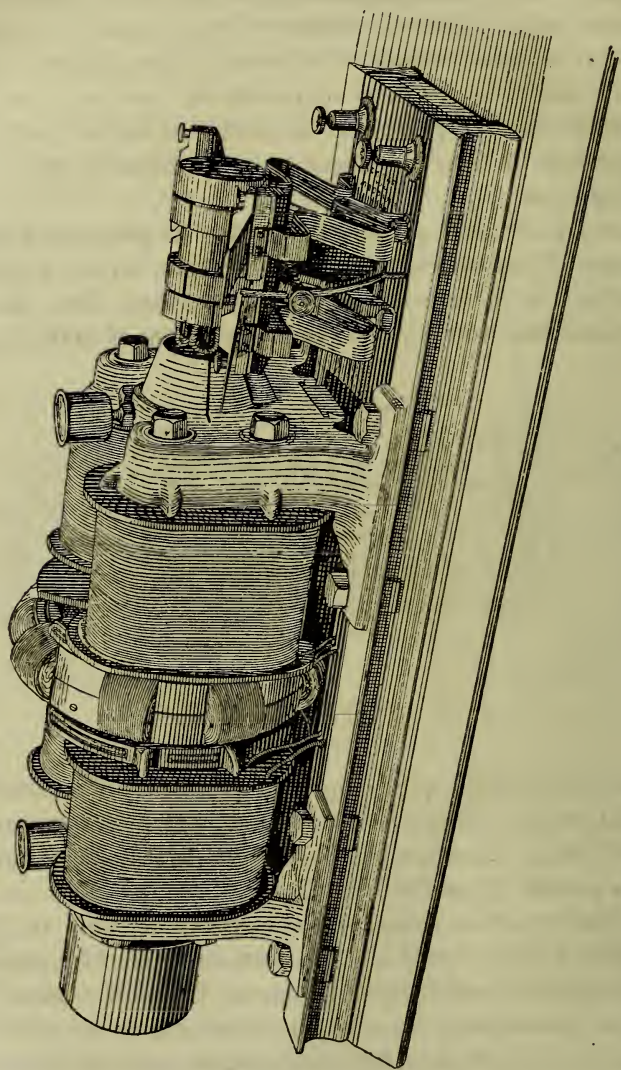


Fig. 385. — Machine Brush.

diamétralement opposée et d'autre part à l'une des lames du commutateur.

Nous avons supposé les machines élémentaires groupées en série et les électro-aimants placés également en série avec le circuit exté-

rieur. Mais d'autres dispositions pourraient être adoptées ; c'est ainsi que les machines élémentaires pourraient être réunies parallèlement (en quantité), et non en série ; — que les électro-aimants inducteurs pourraient recevoir directement le courant d'une excitatrice, etc. ; mais cela ne touche en rien au principe du système.

499. Applications des électro-aimants. — Les courants agissent sur les courants par attraction et par répulsion, directement ; directement aussi ils agissent sur les aimants ou subissent l'action des aimants ; enfin sous la forme d'électro-aimants ils exercent des actions sur le fer doux. Ces propriétés mécaniques ont reçu de nombreuses applications : nous ne nous occuperons ici que des actions qui correspondent à une action mécanique d'une certaine importance.

Nous nous occuperons d'abord des appareils dans lesquels on utilise la force d'attraction des électro-aimants.

On ne connaît pas d'une manière absolue les lois qui président aux actions produites par les électro-aimants : il semble prouvé cependant que le moment magnétique, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnel au nombre de tours de l'hélice magnétisante et à l'intensité du courant ; et que la force attractive exercée sur un fer doux est proportionnelle au carré des mêmes quantités. On connaît moins bien l'influence des dimensions du noyau.

Bien que l'on puisse utiliser des solénoïdes sans noyau de fer doux, en général, on emploie des bobines à noyau de fer doux, de manière à obtenir un champ magnétique plus intense.

Les attractions exercées varient rapidement avec la distance, décroissant quand celle-ci augmente de telle sorte que, autant que possible, il faut chercher à utiliser des actions au contact ou à très petite distance.

500. Des électro-trieuses. — L'attraction exercée par les électro-aimants a été utilisée dans quelques cas pour séparer les poussières de métaux magnétiques ou de substances magnétiques quelconques mélangées avec d'autres substances. Il suffit de faire passer le mélange sur les électro-aimants, ou seulement à une faible distance, pour que la séparation s'effectue, les substances magnétiques étant attirées par les pôles des électro-aimants.

Il existe divers systèmes fort simples et sur lesquels il suffit de donner quelques renseignements généraux.

Dans certains appareils, tel que celui de M. Chenot, les électro-aimants se déplacent, tournant, par exemple, autour d'un axe ; ils reçoivent le courant et sont actifs pour les positions où ils se

trouvent en contact avec les mélanges de poussières et entraînent alors les matières magnétiques ; mais dans la seconde partie de la rotation, ils ne reçoivent plus de courant, cessent d'être aimantés, et laissent tomber dans un réservoir spécial les particules qu'ils avaient entraînées.

Dans les systèmes de M. Vavin et de M. Siemens, les électro-aimants

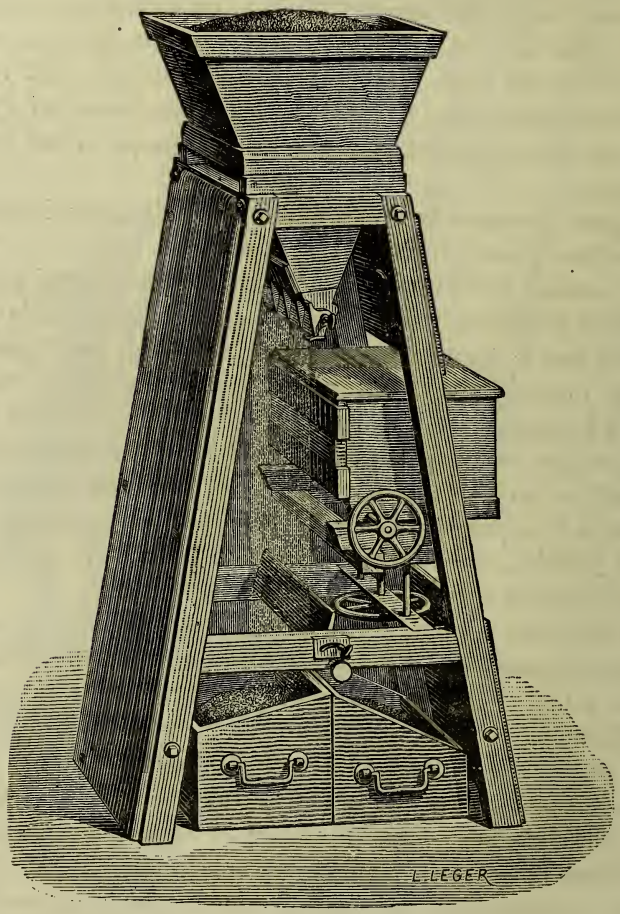


Fig. 386. — Séparateur magnétique d'Edison. (*La Lumière électrique.*)

agissent d'une manière continue, mais les particules magnétiques sont détachées et entraînées à l'aide de brosses tournantes ou de râcloirs spéciaux.

Le séparateur magnétique de M. Edison (fig. 386) est autrement disposé : le mélange de poussières s'écoule d'une trémie en une

mince lame verticale qui passe dans le voisinage de puissants électro-aimants; les particules magnétiques, sans venir jusqu'au contact des électro-aimants, sont déviées de leur direction et forment une seconde nappe qui continue à tomber, mais en restant à une certaine distance du reste des poussières qui ont continué à descendre verticalement, de telle sorte que, à la partie inférieure, on les recueille facilement dans deux réservoirs distincts.

501. — L'attraction magnétique exercée par les électro-aimants a été appliquée à l'épuration de la pâte à porcelaine, chez MM. Pillivuyt et Cie, par exemple. L'appareil est d'ailleurs fort simple. Il consiste en un électro-aimant dont les deux pôles sont en regard, de manière à circonscrire un champ magnétique très puissant comme dans l'appareil de Faraday. Une boîte étanche enveloppe ce champ magnétique; elle est ouverte à la partie supérieure et présente sur sa base inférieure l'extrémité du tuyau d'écoulement. La pâte à porcelaine très liquide arrive par en haut, rencontre des plans inclinés qui la dirigent vers les pôles; les parties magnétiques sont retenues et le reste, eau et pâte à porcelaine se rend par le tuyau d'écoulement aux bassins de décantation. Cette épuration ne ralentit en rien le travail, la pâte ne faisant que traverser le champ magnétique et ne demandant aucune manœuvre spéciale.

Lorsque l'on veut débarrasser les électro-aimants des résidus qui y sont attachés, on les met hors circuit ou au moins en court circuit, ce qui annule presque leur magnétisme et on projette sur les pôles un courant d'eau qui entraîne les parcelles de matière ferrugineuse.

On a évalué à 7 ou 8 kilogrammes le poids de ces parcelles pour 100 000 kilogrammes de pâte. Chacune de ces particules, qui paraissent constituées par du silicate de fer, aurait produit une tache.

502. Moteurs électriques. Freins électriques. — L'attraction produite par les électro-aimants a été utilisée dans quelques autres circonstances, mais sans que jusqu'à présent les résultats aient été absolument satisfaisants.

C'est ainsi que nous signalerons les premiers moteurs électriques qui fonctionnaient sous l'influence de courants, comme l'appareil de Jacobi, comme celui de Froment. Mais il y avait des conditions défavorables et il n'y a pas à insister, ces moteurs étant remplacés avantageusement maintenant par des machines d'induction de formes diverses servant comme réceptrices comme nous le dirons plus loin.

Les électro-aimants sont également utilisés, pour l'attraction

énergique qu'ils peuvent produire, dans les freins électriques, parmi lesquels nous signalerons le frein Achard dont nous indiquerons seulement le principe.

A côté d'un essieu d'un wagon et placé parallèlement se trouve un arbre sur lequel est monté à frottement doux un cylindre, portant un électro-aimant dont les pièces polaires débordant la bobine sont au contact de l'essieu par leur surface latérale, ou au moins à une très petite distance. Sur les manchons sont fixées les extrémités de chaînes qui commandent le frein proprement dit. Tant que le courant ne passe pas, l'essieu tourne à côté de l'électro-aimant, sans qu'il y ait entraînement; mais sitôt qu'on envoie le courant, il y a adhérence entre l'e ssieu et l'électro-aimant; celui-ci est entraîné par la rotation de l'essieu, ainsi que les manchons dont il est solidaire; les chaînes s'enroulent, le frein se serre.

Cet appareil présente certainement une grande rapidité d'action et sa mise en fonction est simple; mais il est brusque, d'une manière générale, et produit le calage plutôt que le serrage qui est plus avantageux dans la pratique. Aussi son emploi ne paraît pas se généraliser et il n'est pas sorti encore de la période expérimentale.

503. Indicateur magnétique de vitesse. — Cet appareil imaginé par M. Marcel Deprez (1881) et destiné à mesurer la vitesse des mouvements rapides de rotation repose sur la production des courants de Foucault et reproduit sous une forme spéciale l'expérience classique d'Arago.

Il se compose d'un aimant en U (fig. 387) tournant autour d'un axe parallèle à sa longueur; cet axe qui repose à ses extrémités sur deux coussinets est creux. Entre les branches de l'aimant A est placé un cylindre creux de cuivre qui se prolonge par deux couteaux E, F; ceux-ci passant à travers l'axe creux de l'aimant vont reposer sur des supports; sur l'un de ces couteaux est fixée une longue aiguille BI qui se déplace devant un arc divisé.

Lorsque l'aimant tourne rapidement, des courants naissent dans le cylindre qui est entraîné dans le sens de la rotation de l'aimant et qui tend à tourner également; mais un contrepoids H placé au-dessous de l'axe, et dont la position doit varier avec la sensibilité qu'on veut donner à l'appareil, s'oppose au mouvement continu et maintient le cylindre à une position fixe qui correspond à la vitesse de l'aimant. Pour augmenter l'effet en concentrant les lignes de force, le cylindre creux de cuivre contient un noyau de fer doux.

Dans cet appareil, l'effort tangentiel qui entraîne le cylindre de

cuivre est proportionnel à la vitesse de l'aimant; l'action du contrepoids varie comme le sinus de l'angle d'écart, ou, si l'angle est petit, comme l'angle d'écart lui-même, de telle sorte que l'on peut admettre qu'il y a proportionnalité entre ces deux éléments, ce qui permet de graduer aisément l'appareil.

504. — M. Horn a décrit récemment un appareil basé sur le même principe, mais dans lequel les indications sont indépendantes des variations du magnétisme de l'aimant. Il comprend un aimant en U entre les pôles duquel un tube creux en cuivre est mis en rotation rapide par la machine; à l'intérieur du tube et mobile autour d'un axe horizontal se trouve un fer doux dont la section a la forme

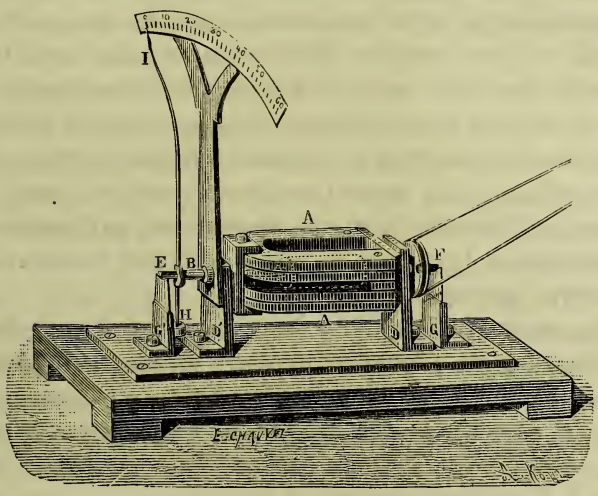


Fig. 337. — Indicateur magnétique de vitesse. (*La Lumière électrique.*)

d'un double T et qui porte l'aiguille indicatrice. Par la rotation du cylindre de cuivre des courants de Foucault y prennent naissance et le fer doux est entraîné. L'action de l'aimant permanent sur le fer doux est proportionnel au carré de l'intensité du champ magnétique; mais d'autre part l'intensité des courants produits est proportionnel à ce champ et l'aimantation du fer doux également, de telle sorte que l'action du cylindre de cuivre est aussi proportionnelle au carré du champ magnétique. Les variations de celui-ci n'influenceront donc pas la déviation de l'aiguille.

Comme dans l'appareil de M. Deprez, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux vitesses de rotation.

504. Des machines d'induction comme moteurs. — Lorsqu'une

machine d'induction est mise en mouvement, il faut fournir du travail mécanique pour que l'action se continue; c'est la condition de production du courant; si, inversement, on fait passer un courant dans une machine à courants continus, la machine entre en mouvement et est susceptible de produire un travail mécanique. Dans aucun de ces cas d'ailleurs, et pour diverses raisons, on ne retrouve l'équivalent de ce qui a été fourni, il y a toujours une certaine perte d'énergie, ou, plutôt transformation d'une partie de l'énergie sous une forme autre que travail ou courant.

Si on dispose d'une source assez puissante de courant électrique on pourra l'utiliser pour faire fonctionner une machine d'induction qui servira de moteur pour tel usage que l'on voudra. Cette disposition est principalement employée lorsque la source d'électricité est une machine d'induction, comme nous le dirons spécialement plus loin; mais, dans quelques circonstances, on a pu se servir de piles ou d'accumulateurs comme source d'électricité.

Les machines d'induction à courants continus peuvent, en principe, être utilisées ainsi comme machines motrices; mais, en réalité, il convient d'adopter quelques dispositions particulières. C'est surtout la position des balais, le *calage* qu'il faut modifier et nous ne signalerons que ce point.

Théoriquement les balais devraient être placés à angle droit avec la ligne des pôles (en admettant qu'il n'y ait que deux pôles) c'est-à-dire à la position théorique du diamètre de commutation; mais cette ligne se déplace par le fait même du fonctionnement de la machine, ainsi que nous l'avons indiqué (483); seulement le déplacement de la ligne de commutation se fait en sens contraire suivant que la machine d'induction agit comme productrice de courants ou comme mue par l'action d'un courant. Lors donc que l'on voudra utiliser une machine de l'une ou de l'autre manière, il conviendra de changer la position des balais; il existe diverses dispositions qui permettent de placer ces balais à la position la plus convenable. Si comme il arrive fréquemment quand la machine sert de moteur, elle doit tourner tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, ce qui s'obtient aisément en renversant le courant, la position des balais doit changer; on a imaginé divers systèmes qui permettent de les faire rapidement passer d'une position à l'autre.

Nous n'avons pas à décrire les machines qui peuvent être utilisées, pour la production du travail mécanique, puisque nous les avons indiquées précédemment et bien que certains modèles soient plus spécialement construits et utilisés comme moteurs, ainsi que

nous l'avons dit, d'ailleurs. Nous allons seulement passer en revue quelques-uns des cas dans lesquels on a pu utiliser avantageusement des machines d'induction pour produire du travail mécanique.

505. — Dans quelques circonstances très spéciales, on a utilisé comme moteur une machine d'induction animée par une pile; mais, on le sait, le prix de l'électricité fournie par les piles est élevé et ce procédé ne peut servir que dans des cas exceptionnels où la question d'économie n'a pas à intervenir.

C'est ainsi que cette source de courants est quelquefois utilisée dans les laboratoires pour mettre en mouvement quelques appareils n'exigeant qu'une faible dépense de travail mécanique, mais devant fonctionner avec régularité pendant un temps assez court.

On s'en est servi également dans des expériences relatives à la direction des aérostats : c'est la disposition qui a été adoptée par MM. Tissandier et dans laquelle il s'agissait de communiquer à une hélice un rapide mouvement de rotation. La batterie électrique est une pile au bichromate de potasse disposée de manière à présenter le moindre poids possible; elle comprend en somme 24 éléments montés en tension, le liquide est employé à la température de 40°. La batterie est disposée de manière à ce qu'on puisse aisément et rapidement faire passer le liquide dans un vase spécial lorsque la pile ne doit pas fonctionner, de manière à éviter la polarisation. Le moteur est une machine Siemens à bobine très longue relativement à son diamètre : elle fait 1800 tours par minute et développe un travail de 100 kilogrammètres par seconde; son poids est de 54 kilogrammes seulement.

C'est également une pile qui fut employée pour faire mouvoir l'hélice du ballon dirigeable de MM. Renard et Krebs.

On s'est plus souvent servi des accumulateurs pour produire le courant nécessaire; c'est ce procédé qui a été utilisé à la blanchisserie de M. Duchenne-Fournet par M. Clovis Dupuy où une petite locomotive électrique est utilisée pour faire mouvoir un train qui emporte les toiles que l'on doit étendre sur les prés.

Les accumulateurs sont chargés par une machine qui pendant la nuit sert à l'éclairage; ils sont réunis au nombre de 60 dans un fourgon placé à la suite de la locomotive. Chaque accumulateur pèse 8 kilogrammes et peut fonctionner pendant deux heures : le poids du fourgon chargé est de 700 kilogrammes.

La locomotive, du poids de 935 kilogrammes, comprend une machine dynamo-électrique Siemens pesant 104 kilogrammes et pouvant développer 200 kilogrammètres par seconde. Comme tous

les appareils destinés à la traction, le système est pourvu d'un changement de marche et d'un rhéostat. Le changement a pour effet de renverser le sens du courant dans la machine motrice et par suite le sens du mouvement de rotation; mais il faut y joindre une disposition qui change les balais récepteurs, le calage devant être modifié suivant que la rotation de la machine a lieu dans l'un ou l'autre sens.

Le rhéostat introduit ou supprime des résistances accessoires dans le circuit et fait varier, par conséquent, l'intensité du courant, et par suite la puissance de la machine, puissance qui doit changer avec la vitesse que l'on veut atteindre, avec le profil de la voie, palier, pente ou rampe, avec le poids à traîner, etc.

Dans ce cas particulier, le fait que la machine productrice de l'énergie existait et était inutilisée pendant une partie de la journée rendait la disposition avantageuse : il pourrait n'en être pas ainsi s'il fallait installer spécialement et uniquement pour cet effet la machine produisant la charge des accumulateurs. Il n'y a pas de doute qu'il n'y ait possibilité d'opérer ainsi, mais on ne saurait affirmer que, d'une manière générale, il y ait économie. Aussi les expériences que l'on a faites pour faire marcher des omnibus et des tramways à l'aide d'accumulateurs placés sur la voiture, expériences qui ont réussi en tant qu'effets satisfaisants produits au point de vue de l'exploitation, n'ont donné lieu à aucune application industrielle, pratique, probablement à cause du prix de revient trop élevé. On conçoit d'ailleurs que ce système présente l'inconvénient réel d'avoir à transporter un poids mort considérable, celui des accumulateurs.

Le même procédé a été utilisé pour faire mouvoir des bateaux; l'inconvénient du poids mort est moins grand; mais le système ne se généralise pas et, en tout cas, on ne voit pas qu'il puisse servir à autre chose qu'à quelques constructions de luxe destinées à la navigation de plaisance.

Une application qui paraît plus satisfaisante est celle qu'en a faite M. Gellerat aux rouleaux-cylindreurs pour remplacer la vapeur comme source de travail mécanique. Ici l'appareil doit être lourd, le poids des accumulateurs ne saurait donc être un inconvénient.

506. Application de la reversibilité des machines d'induction. — Les machines d'induction sont des transformateurs d'énergie ; lorsqu'on les met en mouvement en leur fournissant du travail mécanique elles donnent naissance à des courants électriques;

mais inversement, si dans une machine à courants continus on vient à faire passer un courant émanant d'une source quelconque, d'une pile par exemple, la machine se mettra en mouvement et sera capable de produire du travail mécanique.

Si donc on met dans un même circuit deux machines d'induction et que l'on mette l'une d'elles en mouvement en lui fournissant du travail mécanique, l'autre se mettra également en mouvement quelle que soit la distance qui sépare les deux machines, et la seconde sera susceptible de produire du travail mécanique. Par l'intermédiaire de l'électricité on aura donc ainsi transmis à une distance quelconque du travail mécanique.

Disons que cette expérience a été réalisée pour la première fois en 1873 à l'Exposition de Vienne par M. Fontaine qui avait accouplé deux machines Gramme ; l'une recevait le mouvement d'un moteur à vapeur, l'autre, mue par le courant produit par la première, actionnait une pompe élévatoire.

Depuis, la question a été étudiée par divers savants et constructeurs et, sans insister, il faut citer les noms de M. Marcel Deprez (expériences de Munich, de Vizille, de Paris, 1881), de M. Siemens, etc.

Il est aisé de comprendre les espérances qu'a fait naître l'indication de cette possibilité de transmettre à grande distance, par l'intermédiaire d'un simple conducteur métallique, du travail mécanique. Il ne manque pas de sources inutilisées de travail mécanique, inutilisées parce que l'industrie ne peut s'établir en des points quelconques et que certaines conditions sont nécessaires. C'est ainsi que les chutes d'eau qui existent en grand nombre dans les montagnes fourniraient aisément une immense quantité de travail, mais que les usines, les manufactures où ce travail pourrait être utilisé ne peuvent s'installer dans les montagnes, loin des lieux de consommation, des centres commerciaux, sans communications faciles. Le transport du travail mécanique par l'électricité permet l'utilisation de ces chutes d'eau ; on conçoit qu'il suffise d'établir sur place un établissement hydraulique dans lequel des machines d'induction seront mues sous l'action de ces chutes : le courant produit sera transmis à l'usine qui conservera la situation qu'elle occupe actuellement, celle qui est commercialement la meilleure, et utilisera sous forme de travail mécanique l'énergie que lui apporte le courant.

On comprend que ces transformations, cette transmission ne s'effectuent pas sans perte : ces pertes sont de plusieurs espèces : perte dans la machine génératrice du courant pour la transformation du travail en courant et perte analogue dans la machine réceptrice,

pour la transformation inverse du courant en travail ; perte provenant de l'échauffement des conducteurs par le passage du courant, perte provenant enfin de l'isolement insuffisant des conducteurs qui laissent écouler dans le sol et même dans l'air une partie de l'électricité qui les traverse. On peut donc s'attendre que le rendement, rapport du travail utilisable à l'arrivée au travail employé au départ, s'éloignera notablement de l'unité.

La tendance à peu près générale, au début, fut de s'inquiéter peu de la valeur du rendement ; on espérait utiliser des forces *gratuites ;* le travail moteur ne coûtant rien, quelle que dût être la perte qu'il subirait, le travail utile ne pouvait coûter cher. En réalité la question est loin d'être aussi simple : il faut des installations pour recueillir les forces gratuites, par exemple des roues hydrauliques, des turbines pour utiliser les chutes d'eau, les torrents ; il faut des machines d'induction pour la double transformation de l'énergie, il faut enfin des conducteurs métalliques dont le prix n'est pas négligeable dès que la distance est un peu considérable. Il faut donc de toute nécessité un capital et il y a lieu de calculer l'intérêt et l'amortissement de ce capital. Il y a d'autre part les frais qu'entraînent nécessairement et constamment l'entretien et la surveillance des diverses machines employées. De telle sorte que bien que, en réalité, la force utilisée soit gratuite, le travail recueilli n'en a pas moins un prix qui ne saurait être nul et qui dépend nécessairement du rendement du système. On conçoit donc la nécessité de calculer à l'avance ce rendement, de déterminer les conditions qui peuvent le faire varier et de chercher à le rendre le plus élevé possible. Il y a certainement des conditions dans lesquelles les avantages de la transmission du travail par l'électricité sont tels que ce procédé doive être utilisé quel qu'en soit le prix ; mais ce ne sont pas les circonstances qui se présentent ordinairement : dans la pratique, il faut obtenir le travail mécanique au plus bas prix possible.

Nous allons chercher, d'une manière générale, ce que la théorie apprend des conditions dans lesquelles se produit la transmission de l'énergie, sans tenir compte des imperfections des appareils, de telle sorte que nous arriverons ainsi à un maximum de rendement, maximum qui ne sera certainement jamais atteint dans la pratique où l'on ne rencontre pas les conditions de perfection que nous imaginons.

507. Étude générale des conditions de la transmission de l'énergie par le courant. — Soit un circuit comprenant une machine génératrice A transformant le travail mécanique en courant

et une machine réceptrice B produisant la transformation inverse.

Soit T_m le travail moteur communiqué à la machine A; supposons que la transformation d'énergie se fasse intégralement, ce qui n'est jamais le cas; il en résultera un courant d'intensité I et il s'établira dans la machine une différence de potentiel correspondant à une force électro-motrice E; puisque nous admettons que la transformation s'établit sans perte, nous avons

$$T_m = EI. \tag{1}$$

Lorsque la machine génératrice est en action, mais que la réceptrice B étant maintenue immobile ne produit aucun travail, le courant a une intensité déterminée par la loi de Ohm; mais cette intensité diminue si la réceptrice entre en action à son tour et produit du travail mécanique. L'effet produit peut s'expliquer *a priori* soit par une augmentation de la résistance, soit par la production d'une force électromotrice contraire à celle de la machine A, d'une force contre-électromotrice suivant l'expression consacrée. On peut dire que cette dernière explication paraît seule satisfaisante au point de vue physique, c'est une conséquence de la propriété si fréquemment observée de la reversibilité; on comprend moins aisément comment se produirait une augmentation de résistance. Il y a, il est vrai par le fonctionnement même du système des variations de température qui modifient les conductibilités mais qui sont loin d'expliquer les faits que nous indiquons.

Lorsque l'on effectue les mesures d'intensité dans cette expérience, on peut aisément calculer soit la valeur de la résistance fictive, soit la valeur de la force contre-électromotrice correspondant au fonctionnement de la réceptrice B [1].

1. Soient R la résistance totale du circuit, x la résistance fictive, i_0 l'intensité du courant lorsque la réceptrice ne fonctionne pas, i l'intensité lorsqu'elle fonctionne; on a, E étant la force électro-motrice de la génératrice

$$i_0 = \frac{E}{R}$$

et

$$i = \frac{E}{R + x}$$

On peut aisément trouver x en fonction soit de E, soit de R; il vient en effet

$$x = R\,\frac{i_0 - i}{i}$$

et

$$x = E\,\frac{i_0 - i}{i_0 i}$$

Si nous appelons E′ la force contre-électromotrice qui prend naissance dans la réceptrice B quand celle-ci fonctionne, si T_u est le *travail utile* qu'elle fournit, comme ce travail représente la totalité de l'énergie transformée par la réceptrice, puisque nous admettons qu'il n'y a pas d'effets accessoires nuisibles, on doit avoir

$$T_u = E'I \qquad (2)$$

I étant l'intensité du courant, intensité qui est la même que celle qui existe dans la génératrice puisque dans un circuit parfaitement isolé (et nous admettons que le circuit est dans ces conditions théoriques), l'intensité du courant est partout la même.

En même temps que se produit ce phénomène principal, et d'autres accessoires, nuisibles, que nous négligeons pour rester dans les conditions les plus favorables, il est un effet qui existe par le fait même du passage du courant et dont nous devons tenir compte : c'est l'échauffement des conducteurs, condition forcée qui accompagne le courant même. Les lois de Joule font connaître la quantité d'énergie ainsi nécessairement transformée en chaleur ; si R est la résistance totale des conducteurs (résistance qui se compose de la résistance r de la génératrice A, de celle r' de la réceptrice B et de celle λ des conducteurs qui relient les deux machines), l'énergie transformée a pour valeur RI^2. Puisque nous négligeons de parti pris toutes les autres causes de perte d'énergie, cette quantité d'énergie représente la différence entre l'énergie

Soit, d'autre part E′ la valeur de la force contre-électromotrice que l'on suppose dans B; on a alors immédiatement

$$i_0 = \frac{E}{R}$$

et

$$i = \frac{E - E'}{R}$$

La dernière équation donne E′

$$E' = E - Ri$$

Mais on peut, à l'aide des deux équations calculer E en fonction soit de R, soit de E; il vient:

$$E' = R\,(i_0 - i)$$

et

$$E' = E\,\frac{i_0 - i}{i_0}$$

fournie et l'énergie reçue, entre le travail moteur et le travail utile; on a

$$T_m - T_u = RI^2 \qquad (3)$$

508. — Il y a ainsi trois relations entre les six quantités qui entrent dans ces équations; on pourra donc prendre trois quantités à volonté, dans les limites toutefois qu'indiquera la discussion de ces équations, et les trois autres s'en déduiront.

Le rendement est par définition le rapport du travail utile au travail moteur, $\frac{T_u}{T_m}$; désignons-le par K : il résulte des équations 1 et 2 la relation importante.

$$K = \frac{E'}{E}$$

Éliminons I entre les équations 1 et 3; on arrive immédiatement à la relation

$$RT_m^2 - E^2T_m + E^2T_u = 0$$

qui pour des valeurs données de R et de E permet de reconnaître rapidement quelles relations doivent exister entre T_m et T_u : une discussion géométrique le montre facilement.

Convenons de prendre T_m pour abscisses, T_u pour ordonnées : l'équation précédente représente alors une parabole que l'on peut construire aisément (fig. 388). En effet son axe est vertical, la courbe coupe l'axe des abscisses à l'origine et en un point A dont l'abscisse est $\frac{E^2}{R}$; son axe DB a dès lors pour abscisse $\frac{E^2}{2R}$ et la valeur correspondante de l'ordonnée qui donne le sommet C est $\frac{E^2}{4R}$. Ajoutons que la tangente à l'origine OD est inclinée à 45° sur les axes et qu'il en est de même, par conséquent, pour la tangente au point A : il est donc très aisé de construire cette courbe.

Cette courbe correspondant à des valeurs données de E et de R, pour chaque point, l'abscisse et l'ordonnée représentent le travail moteur et le travail utile c'est-à-dire les éléments intéressants de la question. Si on prend un point M, MP sera le travail utile et OP le travail moteur. On voit alors que le rendement est donné par le coefficient angulaire de la droite OM.

L'examen de la figure montre immédiatement que pour chaque valeur OP du travail moteur, il y a un travail utile et un seul repré-

senté par MP, à la condition toutefois que le travail moteur soit moindre que $\frac{E^2}{R}$, car au delà on aurait des valeurs négatives pour T_u; naturellement pour chaque valeur de T_m il y aura une valeur du rendement et une seule. Mais les résultats ne seront pas les mêmes si on se donne une valeur de T_u; cette valeur devra être moindre nécessairement que BC c'est-à-dire que $\frac{E^2}{4R}$ ou au plus égale à cette quantité. Pour toutes les valeurs OQ de T_u moindre que BC il y aura deux valeurs correspondantes de T_m, par exemple OP′ et OP, il y aura naturellement aussi deux valeurs correspondantes du rendement, à savoir les coefficients angulaires de OM et

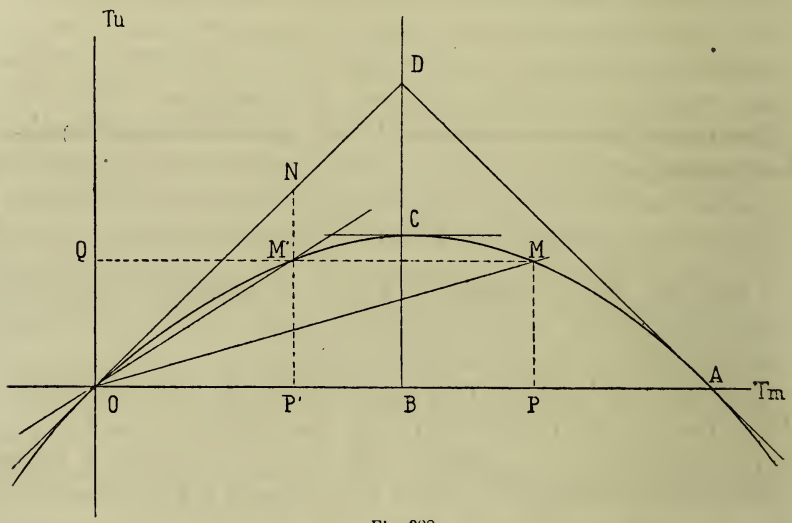


Fig. 388.

de OM′. Il va sans dire que dans la pratique, on prendra toujours la valeur correspondante au plus grand rendement. L'angle M′OA étant nécessairement toujours plus grand que MOA, nous n'aurons donc à considérer que les points compris dans la partie OC de la courbe.

On voit immédiatement que le rendement, coefficient angulaire de la corde OM′ est toujours plus petit que 1, coefficient angulaire de la tangente en O; — que le rendement est d'autant moindre que le travail moteur est plus grand pour des valeurs données de E et de R bien entendu, c'est-à-dire pour une courbe donnée; — que pour ces valeurs la plus grande valeur possible du travail utile est représentée par BC moitié de OB, c'est-à-dire qu'il est la moitié du travail moteur, que le rendement est 1/2.

509. — On voit donc que, au point de vue théorique, pour avoir le meilleur rendement possible, on a tout intérêt pour des valeurs données de E et de R à transmettre la plus petite quantité possible de travail mécanique. Il va sans dire qu'il n'en est pas ainsi pour la pratique; qu'il n'est pas indifférent, pour un système donné de machines et de conducteurs dont l'installation et l'entretien sont une cause de dépenses, de faire produire une petite ou une grande quantité de travail; que c'est là une considération qui tendrait à faire prendre une valeur de T_u la plus grande possible, et que, dans chaque cas particulier il conviendra de discuter la question pour rechercher quelle sera, tout compte fait, la solution la plus économique possible.

La figure que nous venons d'étudier fournit encore d'autres renseignements : c'est ainsi que la tangente OD étant inclinée à 45°, on a $P'N = OP'$ et que par suite $M'N = T_m - T_u$, c'est-à-dire que M'N mesure RI^2, soit la quantité d'énergie qui est transformée en chaleur dans le circuit tout entier. On voit que cette grandeur croît avec OP', mais plus rapidement, ce qui correspond à la diminution du rendement.

L'équation 1, montre que pour une valeur donnée de R l'intensité du courant I varie proportionnellement à T_m puisque l'on a $T_m = EI$; donc pour une solution donnée, on trouvera aisément la valeur correspondante de I [1].

Il est aisé de se rendre compte de ce qui arrive lorsque l'on fait varier une seule des quantités E ou R : la parabole change de forme, mais dans chaque cas, on la construit aisément puisque le point O est fixe et que les points A et B sont donnés seulement en fonction de $\frac{E^2}{R}$. Par exemple, soit la parabole OAB (fig. 389), elle sera remplacée par OA'B' si E augmente ou si R diminue. On voit alors que pour obtenir une valeur OQ de T_u il faut prendre dans le deuxième cas une valeur OP' de T_m plus petite que dans le premier cas; il y aura donc avantage, le rendement sera augmenté pour le second cas.

Bien entendu les résultats seraient inverses si on diminuait E ou si l'on augmentait R.

On ne peut rien dire, en général, si l'on fait varier à la fois E et R; mais il est un cas particulier intéressant à signaler, c'est celui où ces quantités varient de telle sorte que le rapport $\frac{E^2}{R}$ ne change pas. Dans ce cas, quelles que soient les valeurs attribuées à E et à

1. On pourrait d'ailleurs faire une discussion analogue en se servant de l'équation $RI^2 - EI + T_u = 0$ obtenue en éliminant T_m entre les équations 1 et 3.

R, la parabole reste invariable puisque la position des points A et C ne dépend que de ce rapport invariable $\frac{E^2}{R}$ et il sera possible d'obtenir une valeur donnée de T_u avec le même rendement quelle que soit R : si donc on veut transmettre une certaine quantité de travail à une distance quelconque, c'est-à-dire pour une valeur quelconque de R on pourra, en choisissant pour E une valeur convenable, obtenir ce résultat avec le même rendement que si la distance était moindre, c'est-à-dire que si R était plus petit. C'est le résultat que M. Marcel Deprez a exprimé d'une manière concise en disant que le *rendement est indépendant de la distance.*

Au point de vue pratique, il se présente ici la même difficulté que nous avons indiquée plus haut ; certes, en choisissant convena-

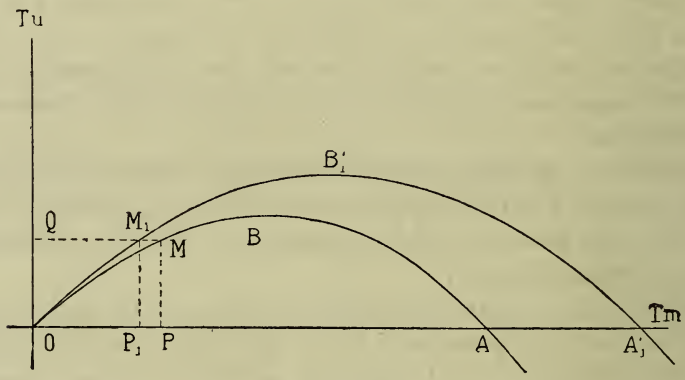


Fig. 389.

blement les machines, on pourra obtenir le même rendement à 1 kilomètre ou à 100 kilomètres ; mais une machine donnée sera susceptible de transmettre absolument une plus grande quantité de travail à petite distance qu'à grande distance. De telle sorte que, malgré l'égalité de rendement, et à cause des dépenses d'installation et d'entretien, le prix de l'unité de travail recueillie sur la réceptrice sera plus grand à grande distance qu'à petite distance. Il y aura donc à tenir compte de tous ces éléments pour arriver au meilleur résultat dans chaque cas particulier.

Nous serons conduit à revenir sur cette question lorsque nous étudierons les conditions qui font varier E.

510. — Il résulte de ce qui précède que la quantité $\frac{E^2}{R}$ caractérise les conditions matérielles d'une installation de transmission de

l'énergie; il n'est pas sans intérêt de remarquer que si l'on se donne *a priori* T_m et T_u, la considération de la parabole qui a servi à la discussion permet de déterminer cette valeur.

Si l'on se donne en effet T_m et T_u, on définit M (fig. 390) un point de la parabole; il est dès lors facile de la construire puisque l'on connaît les autres éléments suivants :

Un second point, l'origine O, et la tangente en ce point inclinée à 45°; — la direction de l'axe qui est parallèle à l'axe OT_u.

Il résulte des propriétés élémentaires de la parabole que, les

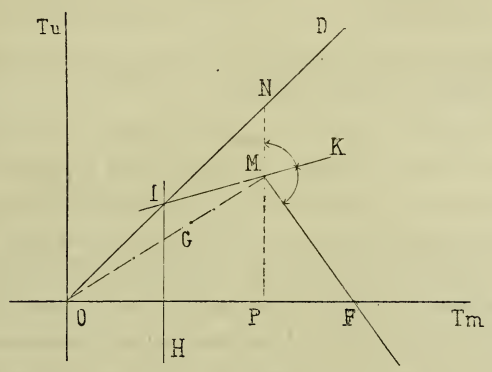


Fig. 390.

tangentes en O et en A (fig. 388) étant inclinés à 45° sur la corde OA, celle-ci passe par le foyer qui, dès lors coïncide avec le point B. Nous allons chercher à déterminer ce point et nous savons que l'on a :

$$OB = \frac{E^2}{2R}$$

Pour cela, menons la corde OM (fig. 390) et par le milieu G menons une parallèle GH à OT_u; ce sera un diamètre de la parabole; il coupera la tangente OD en un point I. Joignons ce point à M, la droite IM est tangente à la parabole en M : faisons alors un angle KMF égal à l'angle KMN, la droite MF sera un lieu du point F, puisque la tangente est la bissectrice de l'angle formée par le rayon vecteur et la parallèle à l'axe menée par le point de contact. Le foyer F sera dès lors au point de rencontre de cette droite MF et de l'axe OT_m.

En doublant la distance OF on aura la valeur du rapport $\frac{E^2}{R}$.

Ayant déterminé la quantité T_m de travail mécanique que l'on transmettra, il existe une indétermination dans les autres données

du problème : on a en effet la relation $T_m = EI$ et il y a une infinité de couples de valeurs de E et de I qui satisfont à cette équation : à chacun de ces couples de valeur correspond une solution complète de la question. E′ est connu puisque l'on doit avoir :

$$\frac{E'}{E} = K$$

et R est donné par la relation :

$$I = \frac{E - E'}{R}$$

que l'on déduit de la loi de Ohm ou qui résulte de l'élimination de T_m et T_u entre les équations 1, 2 et 3.

Si, comme on était porté à le faire au début, on ne veut admettre pour E que de faibles valeurs, il faudra que I atteigne de grandes valeurs et par suite il faudra que R soit petit : il faudra donc des conducteurs de grande section, conducteurs coûteux d'ailleurs. Si au contraire, comme le propose M. Marcel Deprez, on accepte pour E des valeurs élevées, alors on aura pour I des valeurs faibles et par suite les conducteurs de petite section seront moins coûteux. C'est là un des éléments de la question, ce n'est pas le seul.

Aux grandes valeurs de la force électromotrice, on a objecté les dangers que peuvent faire courir des machines présentant entre leurs bornes des différences de potentiel de 2000, 3000 volts, de 8000 et même 10000 volts comme M. Marcel Deprez l'a proposé et l'a réalisé dans l'expérience de Creil. Ces dangers sont réels; mais on peut dire que toutes les machines puissantes, quelle que soit leur nature, présentent des dangers; on évite les accidents par des précautions sagement prises, par des réglementations sévères; il sera nécessaire d'agir de même pour les machines électriques; il faudra mettre ces appareils hors de la portée des étourdis et des ignorants, cela va sans dire, mais n'en est-il pas de même des machines à vapeur de grande puissance? L'objection n'est pas de nature à faire rejeter cette solution.

511. — Nous avons admis que les transformations de travail mécanique en électricité ou réciproquement se font intégralement et c'est à cette condition que nous avons trouvé pour valeur du rendement $R = \frac{E'}{E}$; mais en réalité la question est moins simple et il y a des causes de perte dont les principales sont : la self-induction des spires de l'induit, la production des courants de Foucault dans

les noyaux de fer en mouvement et les variations de résistance au contact des balais et des collecteurs. Ces effets se manifestent aussi bien à la génératrice qu'à la réceptrice.

On doit donc écrire :

$$QT_m = EI$$

et

$$Q'E'I = T_u$$

Q et Q' étant des nombres plus petits que 1 et que M. Cornu a appelés *coefficients de transformation :* ces coefficients ne sont d'ailleurs pas constants pour une même machine et ils dépendent de l'allure de la machine.

Le rendement réel, effectif, celui qu'il est nécessaire de considérer, a pour valeur :

$$\frac{T_u}{T_m} = QQ' \frac{E'}{E}$$

et diffère notablement du rapport $\frac{E'}{E}$ qui ne tient pas compte de ces influences perturbatrices importantes et qui constitue ce que l'on nomme le *rendement électrique*, expression qui peut entraîner quelque confusion.

Bien que le rendement électrique ne présente qu'un intérêt restreint, il peut être utile quelquefois de le considérer. Si l'on imagine que la génératrice et la réceptrice soient identiques, comme elles sont parcourues par le même courant, on peut admettre, comme première approximation que le champ magnétique a la même valeur de part et d'autre et que les forces électromotrices qui prennent naissance dans les deux induits sont proportionnelles à leurs vitesses ou ce qui revient au même au nombre de tours effectués par minute. On aurait donc alors :

$$\frac{E'}{E} = \frac{V'}{V} = \frac{n'}{n}$$

en désignant par V, V', n, n' les vitesses et les nombres de tours de l'induit de la génératrice et de la réceptrice. On aurait donc ainsi par un procédé simple et rapide le moyen de déterminer le rendement électrique dans une expérience donnée. Mais en réalité la question est loin d'être ausssi simple; d'abord il n'arrive pas toujours que la génératrice et la réceptrice soient identiques; puis même lorsque cette condition est réalisée, on ne peut admettre que

les champs magnétiques des deux machines soient identiques; on sait, en effet, qu'il y a une réaction des courants sur le champ magnétique et cette réaction n'est pas la même lorsque le courant prend naissance dans la machine génératrice ou lorsqu'il produit du travail dans la réceptrice; les champs magnétiques n'étant pas identiques, on ne ne peut admettre que les forces électromotrices soient proportionnelles aux vitesses et dès lors le rapport $\frac{n'}{n}$ n'a qu'une relation indirecte et de forme inconnue avec le rendement électrique.

512. — Quelles sont les causes qui, dans le transport, provoquent les pertes et diminuent l'énergie que l'on peut recueillir? Nous ne parlerons pas, bien entendu, des pertes relatives à l'appareil moteur qui actionne la génératrice, non plus que des pertes qui sont afférentes aux appareils mus par la réceptrice et nous nous bornerons aux pertes qui dépendent directement des actions électriques.

Il faut évidemment que les machines d'induction soient construites de manière à diminuer les pertes provenant de la transformation même : diminution des courants de Foucault, et par suite suppression des masses métalliques mobiles dans le champ magnétique, au moins réduction de ces masses; diminution des effets de self-induction, ce qui revient à diminuer le nombre des spires de chaque section de l'induit, suppression des étincelles, ce qui entraîne un calage convenable des balais frotteurs. Il importe aussi de construire de grandes machines : M. Marcel Deprez a avancé que les puissances de machines semblables varient comme les 4es puissances des dimensions homologues; comme les poids et les masses varient seulement comme le cube de ces mêmes dimensions, on conçoit l'avantage des machines de grands modèles; des expériences directes ont permis de vérifier, au moins approximativement, la loi de M. Marcel Deprez.

On a cité une machine de M. Gordon de très grandes dimensions : son poids est de 18 tonnes, la roue qui porte les 32 inducteurs a un diamètre de 2^{m},66; il paraît qu'elle fournit sous forme de courant, une quantité d'énergie qui est 0,94 du travail mécanique qu'elle reçoit.

513. — Une perte de peu d'importance lorsque la distance est faible mais qui est loin d'être négligeable lorsque cette distance est grande est celle due aux conducteurs.

Cette perte est représentée d'abord par la perte de chaleur qui dépend de la nature du fil, de sa résistance, la quantité de chaleur produite RI^2 étant proportionnelle à la résistance, il y a lieu de

choisir des fils aussi conducteurs que possible, des fils de cuivre pur, par exemple; mais alors la question de prix intervient.

L'intensité intervient également et, absolument, les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité; mais ce qui importe, c'est la perte relative, c'est-à-dire le rapport de la perte à l'énergie recueillie qui est E'I; ce rapport est $\frac{RI^2}{E'I} = \frac{RI}{E'}$ et diminue avec I; on serait donc conduit à diminuer I; mais pour obtenir le même résultat il faudrait augmenter E' et par suite E force électromotrice de la génératrice, ce que l'on ne pourrait faire sans augmenter R dans la valeur de laquelle entre la résistance de la génératrice. Il faut dans chaque cas particulier discuter les meilleures conditions en tenant compte de ces divers éléments.

Enfin il faut tenir compte aussi des défauts d'isolement, défauts qui produisent des pertes d'autant plus considérables que le potentiel est plus élevé; dans des expériences faites à Vizille, sur un conducteur de 14 kilomètres la perte atteignait 5 à 6 p. 100 pour une différence de potentiel aux bornes de 3000 volts en moyenne. Ces pertes ne sont pas négligeables, d'autant qu'elles croissent avec la distance et avec la différence de potentiel : aussi pour les expériences de Creil où la distance est de 57 kilomètres et où la différence de potentiel doit atteindre 8000 et même 10 000 volts, M. Marcel Deprez a été conduit à recouvrir le fil conducteur d'une enveloppe isolante protégée elle-même contre l'action des agents atmosphériques par un tube de plomb; il va sans dire que le prix d'un semblable conducteur est fort élevé.

514. Distribution de l'électricité. — Le problème de la généralisation de l'emploi de l'électricité présente de réelles difficultés et, en France, au moins, il n'a pas encore reçu de solution pratique. Comme il arrive, par exemple, pour la force produite par les machines à vapeur où le prix de revient de l'unité diminue à mesure que l'on emploie des machines plus puissantes, la production économique de l'électricité paraît devoir correspondre au développement de grandes quantités d'énergie se présentant sous la forme électrique. Les raisons sont les mêmes dans les deux cas et sont principalement les suivantes : les frais généraux varient beaucoup moins vite que la production, il en est de même dans une certaine mesure des frais d'entretien, enfin le prix des machines puissantes est proportionnellement moins élevé que celui des petites machines et le rendement est meilleur.

Aussi qu'il s'agisse de lumière ou de travail mécanique, l'électricité, dans notre pays, n'est guère utilisée que dans quelques grands

établissements qui sont susceptibles d'utiliser de grandes quantités d'électricité.

Mais l'électricité susceptible, comme le gaz d'éclairage, de fournir de la force et de la lumière, et peut-être plus tard de la chaleur, est appelée à devenir d'un emploi général pouvant être utilisée aussi bien dans les petits ateliers que dans les appartements, dans les magasins. Pour qu'il en soit ainsi il faut que le prix de l'électricité soit abaissé, ce qui ne semble pas pouvoir se produire d'une manière notable si l'électricité doit être obtenue au point où elle est employée. Il faut avoir une usine centrale où, à l'aide de machines puissantes, on recueillera l'énergie sous forme électrique dans des conditions acceptables de bon marché et d'où on la distribuera en tous les points où elle devra être utilisée.

Comment se fera ce transport? on a proposé d'utiliser les accumulateurs dans ce but. Les accumulateurs seraient chargés à l'usine et, par un service de camionnage, transportés aux points où l'électricité doit être employée ; ce procédé ne soutient pas la discussion, le prix du transport matériel des accumulateurs augmenterait dans une grande proportion le prix de l'électricité.

Il est évidemment plus naturel de charger l'électricité même de ce transport; il suffit d'établir des conducteurs entre l'usine et les points où l'électricité doit être employée, le courant s'établira naturellement. Le fait même de ce transport absorbera il est vrai une certaine quantité d'énergie qui apparaîtra sous forme de chaleur et que les lois de Joule permettent d'évaluer; mais cette perte peut n'être pas exagérée. Aussi n'est-il pas douteux que, même en tenant compte du prix d'achat et des frais d'installation des conducteurs, il sera préférable d'établir une véritable distribution d'électricité comme on l'a fait pour l'eau et le gaz plutôt que d'avoir recours à un transport matériel.

L'établissement des conducteurs n'est pas sans présenter des difficultés : il faut naturellement les disposer de manière à éviter les pertes le plus possible; il faut qu'ils soient placés de manière à ne pouvoir occasionner aucun accident, soit aux personnes qui se trouveraient accidentellement en contact avec eux, soit en provoquant des incendies par un échauffement exagéré; il faut encore que cette distribution d'électricité ne puisse pas agir par induction d'une manière fâcheuse sur les réseaux télégraphiques ou téléphoniques.

Il y a là des difficultés réelles, mais elles sont loin d'être insurmontables; elles semblent d'ailleurs avoir été évitées dans les instal-

lations qui ont été faites à New-York, au moins d'une manière suffisante pour la pratique.

515. — Mais, la distribution établie matériellement, le problème n'est pas encore résolu complètement et il ne suffirait pas de faire passer un courant dans les conducteurs avec possibilité d'y établir des branchements qui seraient utilisés en divers points d'une manière quelconque, soit à produire de la lumière, soit à faire marcher une machine dynamo-électrique destinée à produire un travail mécanique, soit à déposer électrolytiquement des métaux. En effet, l'intensité du courant qui circule dépend non seulement de la source, mais aussi de la résistance des conducteurs, résistance qui variera suivant qu'on reliera au conducteur principal un plus ou moins grand nombre de branchements, et aussi des forces contre-électromotrices qui prennent naissance par suite des actions produites. Si donc le générateur du courant est invariable dans son fonctionnement, l'intensité dans les conducteurs variera constamment avec l'emploi plus ou moins grand d'électricité qui sera fait sur le parcours de la distribution; il y aura donc à chaque instant des variations dans les appareils qui resteront en marche, variations qui sont évidemment inacceptables et qui pourraient même détériorer les appareils si le courant prenait une intensité trop grande,

Il importe d'étudier les conditions d'une semblable distribution et d'indiquer comment on peut arriver à obtenir une régularité suffisante; nous supposons que le courant est produit par des machines dynamo-électriques, c'est actuellement, au moins, la source la plus économique que l'on puisse employer.

Étant donnés une machine produisant un courant et un certain nombre d'appareils où l'électricité doit être utilisée et produire des effets, quelconques d'ailleurs, correspondant à l'absorption d'une certaine quantité d'énergie, il existe plusieurs dispositions pour relier à la machine génératrice ces appareils, que nous désignerons d'une manière générale sous le nom de récepteurs. Examinons ces dispositions principales.

516. — 1° *Distribution en série.* — Il est possible d'instituer un circuit unique dans lequel le courant partant de la borne A (fig. 391) de la machine traversera *successivement* les divers récepteurs $R_1, R_2, \ldots R_n$ pour aboutir à la borne B, ayant partout nécessairement la même intensité I.

Pour fonctionner normalement, chaque générateur doit absorber une quantité donnée d'énergie qui est rI^2, r étant la résistance du récepteur (résistance réelle et résistance fictive réunies); pour que

ce fonctionnement soit invariable, il faut donc que I soit constant; la machine génératrice devra donc fonctionner à *intensité constante*. Si E est la force électromotrice de la machine, ρ sa résistance, on a :

$$I = \frac{E}{\rho + \Sigma r}$$

quantité qui doit être invariable, quel que soit le nombre de récepteurs fonctionnant dans le circuit.

Il existe évidemment une solution simple de ce problème; elle consiste, lorsque l'on met un récepteur hors circuit pour arrêter son fonctionnement, à introduire à sa place une résistance précisément égale à r; on ne changera donc pas le dénominateur $\rho+\Sigma r$, et si la machine continue à fonctionner à la même allure, E sera constant également : l'intensité I ne variera donc pas.

Cette introduction de résistances accessoires peut être obtenue de

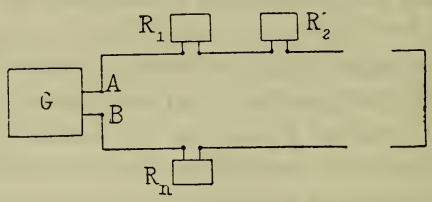


Fig. 391.

diverses façons : soit par un mécanisme direct qui, pour chaque récepteur introduise la résistance par le fait même que ce récepteur est mis hors circuit, soit automatiquement par un dispositif joint à la génératrice et qui introduise ou supprime des résistances accessoires suivant la valeur de l'intensité du courant de manière à tendre à ramener cette intensité à sa valeur normale lorsqu'elle s'en écarte dans un sens ou dans l'autre.

Le travail moteur fourni à la génératrice restera constant puisque la machine possède toujours la même allure (même force électromotrice, même intensité); mais le travail utile variera avec le nombre des récepteurs en action de telle sorte que le rendement sera nécessairement d'autant plus faible qu'il y aura un moins grand nombre de récepteurs fonctionnant. La dépense de travail moteur resterait constante, lors même que les récepteurs étant tous hors circuit il n'y aurait plus de travail utile produit. C'est donc là une solution défavorable au point de vue économique.

Une autre solution se présente : elle consiste à faire varier la force électromotrice de la génératrice au fur et à mesure que varie le nombre des réceptrices placées dans le circuit de manière que le courant conserve la même intensité. Dans cette disposition on dépensera d'autant moins de travail moteur qu'il y aura un moins grand nombre de récepteurs en activité, ce qui est évidemment une condition que l'on doit rechercher. On peut reconnaître cependant que le rendement ne reste pas constant et qu'il diminue au fur et à mesure que le nombre des récepteurs en action diminue également.

Soit I l'intensité du courant qui doit être conservée, soient E la force électromotrice de la génératrice, e celle de l'un des récepteurs, R la résistance de la génératrice, r la résistance vraie (au repos) d'un récepteur : on doit avoir :

$$I = \frac{E - \Sigma e}{R + \Sigma r}$$

d'où l'on déduit la valeur de E qu'il faut obtenir :

$$E = \Sigma e + I (R + \Sigma r)$$

Le rendement sera :

$$K = \frac{\Sigma e}{E} = \frac{\Sigma e}{\Sigma e + I\left(R + \Sigma r\right)} = \frac{1}{1 + I\left(\frac{R}{\Sigma e} + \frac{\Sigma r}{\Sigma e}\right)}$$

On peut bien admettre que $\frac{\Sigma r}{\Sigma e}$ soit constant, cela se présente certainement au moins quand tous les récepteurs sont identiques ; mais comme R ne saurait être nul on voit que le rendement diminue en même temps que Σe, c'est-à-dire au fur et à mesure que le nombre des récepteurs en action diminue.

Nous dirons plus loin comment on peut satisfaire à la condition imposée de faire varier E de manière à maintenir I constant, sensiblement du moins.

517. — 2° *Distribution en quantité.* — Nous pouvons imaginer que chaque récepteur R_1, R_2.... soit relié à la génératrice G (fig. 392) par un circuit distinct, de telle sorte qu'il y a autant de circuits distincts reliés aux bornes de la machine qu'il y a de récepteurs. Dans ce cas, il est nécessaire et suffisant de maintenir constante la différence de potentiel de la machine, car alors quel que soit le nombre de récepteurs en action, le courant dans chaque circuit conservera toujours la même intensité.

Si la résistance de la machine était nulle, il suffirait pour réaliser cette condition de maintenir constante la force électromotrice de la génératrice; mais il n'en est pas ainsi et cette force électromotrice doit varier avec le nombre des récepteurs en action.

Soient E la force électromotrice de la génératrice e celle d'un récepteur, ε la différence de potentiel aux bornes de la génératrice;

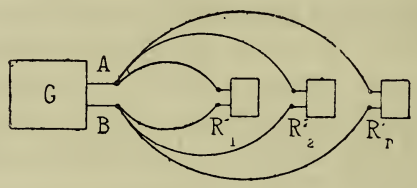


Fig. 392.

soient d'autre part R la résistance de la machine, r celle d'un récepteur y compris le circuit dont il fait partie.

La résistance des circuits dérivés pris ensemble est

$$\frac{1}{\Sigma \frac{1}{r}}$$

et l'on a :

$$\frac{\varepsilon}{E} = \frac{\dfrac{1}{\Sigma \frac{1}{r}}}{R + \dfrac{1}{\Sigma \frac{1}{r}}} = \frac{1}{1 + R\Sigma \frac{1}{r}}$$

ε devant rester constant, on voit que E doit varier avec $\Sigma \frac{I}{r}$, augmentant ou diminuant avec le nombre de récepteurs en action.

Nous pouvons chercher à évaluer le rendement; mais ici, il faut remarquer que l'intensité du courant n'est pas partout la même : mais si I est l'intensité du courant dans la génératrice, i l'intensité dans une dérivation, on sait que l'on a

$$I = \Sigma i$$

L'énergie dépensée dans la génératrice est EI; dans un récepteur elle est ei: le rendement K s era donc :

$$K = \frac{\Sigma e i}{EI} = \frac{\Sigma e i}{E \Sigma i}$$

Mais on a, d'autre part, dans chaque dérivation

$$i = \frac{\varepsilon}{r}$$

ce qui conduit, puisque ε est constant, à

$$K = \frac{\Sigma \frac{e}{r}}{E \Sigma \frac{1}{r}}$$

et en remplaçant E par sa valeur calculée plus haut :

$$K = \frac{\Sigma \frac{e}{r}}{\varepsilon \Sigma \frac{1}{r} \left(1 + R\Sigma . \frac{1}{r} \right)}$$

Si tous les récepteurs sont identiques sans que les résistances des divers circuits le soient, on a :

$$K = \frac{e}{\varepsilon \left(1 + R\Sigma \frac{1}{r} \right)}$$

le rendement diminue au fur et à mesure que le nombre des circuits augmente. Sa valeur ne serait constante que si l'on maintenait constant le produit $R\Sigma \frac{1}{r}$, la résistance de la machine diminuant à mesure que le nombre des circuits croît.

518. — 3° *Distributions diverses.* — Il existe d'autres modes de dis-

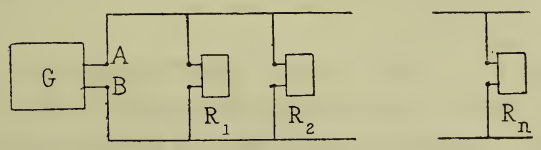


Fig. 393.

tribution que l'on peut rattacher à la distribution par dérivation, mais qui ne présentent pas le degré de simplicité des cas précédents.

Tel est par exemple le cas où deux conducteurs indépendants sont attachés aux deux bornes de la machine et où les récepteurs sont placés sur des traverses reliant ces conducteurs en des points différents (fig. 393).

Les relations qui existent entre les différences de potentiel pour chaque dérivation sont fort compliquées dans ce cas, même lorsque les dérivations ont la même résistance et sont également espacées; les intensités dans les diverses sections varient aussi, ainsi qu'il résulte des calculs de M. Cabanellas et il serait pour le moins difficile d'indiquer les modifications que devrait subir la force électromotrice de la machine pour que le régime restât le même dans certaines dérivations lorsque l'on en supprimerait quelques-unes. Il n'est même pas sûr qu'il soit possible de satisfaire absolument à cette condition.

Une autre disposition qui présente plus d'uniformité que le précédent, sans cependant égaler absolument les effets dans les diverses dérivations, consiste à établir des traverses entre deux conducteurs indépendants et aboutissant aux bornes de la génératrice mais de telle sorte que les extrémités de chaque traverse soient placées en ordre inverse sur chaque conducteur à partir de ces bornes (fig. 394).

Enfin, il peut évidemment y avoir nombre d'autres combinaisons

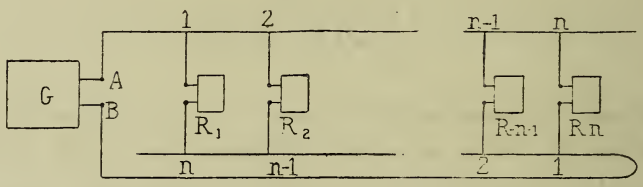


Fig. 394.

plus complexes, mais il est évident qu'il est d'autant plus difficile d'obtenir la régulation du fonctionnement que le réseau présente une forme moins simple.

Quels sont les procédés dont on peut disposer pour satisfaire à l'une des conditions auxquelles on est conduit dans les cas simples : une intensité constante ou une différence de potentiel aux bornes constantes?

519. De la double excitation. — Soit une machine dynamo-électrique et supposons que, sur les inducteurs, il y ait deux fils enroulés (fig. 395) : l'un reçoit un courant i d'une source indépendante, d'une excitatrice par exemple, l'autre un courant émané de la machine elle-même.

Étudions d'abord le cas où le circuit de l'inducteur est en série, le circuit total comprenant le fil de l'anneau de résistance r, le cir-

cuit des inducteurs de résistance ρ, le circuit extérieur de résistance totale (réelle et fictive) x; soit I l'intensité du courant. Nous pouvons admettre comme approximation que la force électromotrice est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique qui est elle-même

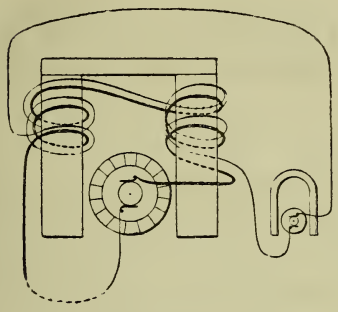


Fig. 395.

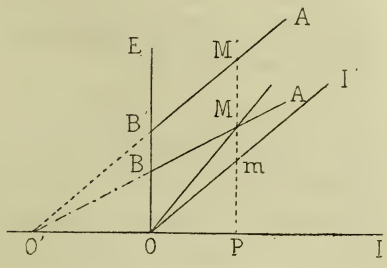


Fig. 396.

proportionnelle à la somme des courants; ce qui revient à remplacer la caractéristique par une droite, comme nous avons dit qu'on peut le faire, au moins entre certaines limites.

Soit :

$$aE = nv\,(I + i)$$

l'équation de cette caractéristique.

Nous avons d'autre part :

$$I = \frac{E}{\rho + r + x}$$

Nous pouvons éliminer I entre ces deux équations; il vient après réduction

$$E = \frac{nvi\,(\rho + r + x)}{a\,(\rho + r + x) - nv}$$

Si nous appelons ε la différence de potentiel aux bornes de la machine, comme on a :

$$\frac{\varepsilon}{E} = \frac{x}{\rho + r + x}$$

on a pour la valeur de cette différence :

$$\varepsilon = \frac{nvix}{a\,(\rho + r + x) - nv}$$

valeur qui peut s'écrire :

$$\varepsilon = \frac{nvi}{a + \frac{a(\rho + r) - nv}{x}}$$

Et l'on voit que l'on peut maintenir ε constant quel que soit x, c'est-à-dire quelles que soient les variations du circuit extérieur pourvu que l'on ait :

$$a(\rho + r) - nv = 0$$

ou

$$\rho + r = \frac{n\,v}{a}$$

La valeur constante de la différence de potentiel est alors :

$$\varepsilon = \frac{nvi}{a}$$

Il n'est pas sans intérêt de signaler que l'on retrouve ainsi la solution à laquelle M. Marcel Deprez est arrivé par une autre méthode. Appliquons en effet à la caractéristique rectiligne BA (fig. 396) la méthode générale pour trouver la différence de potentiel aux bornes (caractéristique externe) (469). Menons OI′ telle que

$$tg\ \mathrm{I'OI} = \rho + r$$

et OM tel que

$$tg\ \mathrm{MOI} = \rho + r + x$$

on aura :

$$= \mathrm{M}m$$

La caractéristique est déterminée par :

$$\mathrm{OB} = \frac{nv}{a}\,i$$

et par :

$$\mathrm{OO'} = -\,i$$

remplaçons cette caractéristique par une autre B′A′ parallèle à OI′; la différence de potentiel aux bornes M′m deviendra constante. Ce changement de caractéristique que l'on obtiendra en modifiant

n aura pour effet, à cause du parallélisme de OI et O'B'A', de satisfaire à la condition

$$\frac{nv}{a} = \rho + r$$

qui est bien celle que nous avons trouvée.

La valeur de M'm est égale à OB', c'est-à-dire à $\frac{nvi}{a}$,qui est également ce que nous avons trouvé.

520. — Imaginons maintenant que le courant au sortir de l'induit se divise en deux circuits; l'un comprenant le fil des inducteurs l'autre le circuit extérieur. Soient, outre les données précédentes, I le courant produit dans l'induit, I_r celui qui contribue à animer les inducteurs, I_x celui qui circule dans le circuit extérieur.

On a, d'abord pour l'équation de la caractéristique :

$$aE = nv\,(I_r + i)$$

On a d'autre part en introduisant les sections réduites

$$\frac{I_r}{\frac{1}{r}} = \frac{I_x}{\frac{1}{x}} = \frac{I}{\frac{1}{r} + \frac{1}{x}}$$

ou

$$rI_r = xI_x = \frac{rxI}{r + x}$$

D'autre part, la résistance totale du circuit est :

$$\rho + \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{x}} = \rho + \frac{rx}{r + x} = \frac{\rho r + \rho x + rx}{r + x}$$

Nous avons alors :

$$I = \frac{E}{\frac{\rho r + \rho x + rx}{r + x}} = \frac{E\,(r + x)}{\rho r + \rho x + rx}$$

Éliminons E, I_r et I entre ces quatre équations.

On a successivement :

$$E = \frac{nv}{a}\left(\frac{x}{r}\,I_x + i\right)$$

et :

$$E = \frac{I(\rho r + \rho x + rx)}{r + x} = I_x \frac{(\rho r + \rho x + r.x)}{r}$$

d'où, égalant :

$$\frac{nv}{a}(xI_x + ri) = I_x(\rho r + \rho x + rx)$$

On déduit enfin :

$$I_x = \frac{\frac{n\,v\,r\,i}{a}}{\rho r + \rho x + rx - \frac{nvx}{a}} = \frac{n\,v\,r\,i}{a\rho r + x(a\rho + ar - nv)}$$

En général, la valeur de I_x dépendra de x; mais elle en deviendra au contraire indépendante si l'on prend :

$$a\rho + ar - nv = 0$$

ou

$$\rho + r = \frac{nv}{a}$$

Dans ce cas, il vient pour valeur constante

$$I_x = \frac{nv}{a} \cdot \frac{1}{\rho} i$$

On remarquera que la condition à laquelle nous arrivons est la même que précédemment, de telle sorte que, comme l'a fait remarquer M. Marcel Deprez, une machine disposée, construite pour satisfaire à l'une des conditions satisfera également à l'autre et qu'il suffira pour passer d'un système à un autre de modifier à l'aide d'un commutateur les liaisons entre les fils de l'induit, de l'inducteur et du circuit extérieur.

521. — Il existe encore d'autres solutions qui ont été proposées pour obtenir automatiquement la régulation du courant dans un système de distribution : nous indiquerons seulement le principe de la disposition adoptée par M. Maxim.

La génératrice du courant est une machine à excitatrice; il est évident que si l'on fait varier la puissance de l'excitatrice, le champ magnétique produit par les inducteurs variera et qu'il en sera de même de l'intensité du courant qui se manifeste dans les induits.

Pour obtenir cette variation, M. Maxim a eu l'idée de modifier le calage des balais : ceux-ci sont montés sur une armature mobile qui tourne sous l'influence d'un levier soumis à l'influence d'un

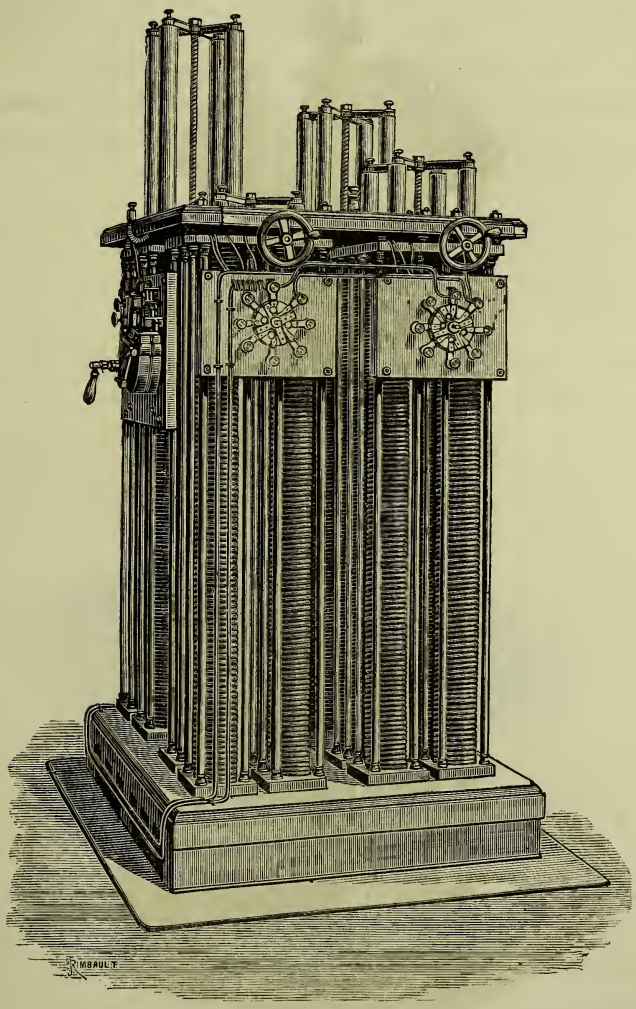


Fig. 397. — Transformateur Gaulard et Gibbs.

ressort qui l'écarte d'un électro-aimant parcouru par le courant induit. Lorsque celui-ci pour une cause quelconque, vient à augmenter d'intensité, l'électro-aimant attire le levier malgré l'action du ressort et produit le mouvement des balais qui s'écartent de leur

position normale, ce qui affaiblit immédiatement le courant dans le circuit inducteur.

Ce système est ingénieux, mais il présente des difficultés dans

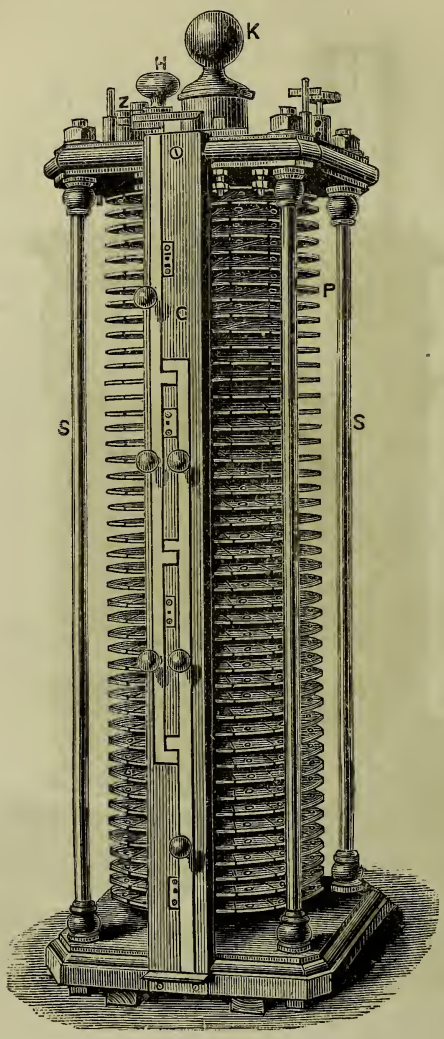


Fig. 398. — Transformateur Gaulard et Gibbs.

l'application et bien que d'ingénieuses dispositions aient été prises pour y remédier, il ne semble pas qu'il se répande : il en est ainsi, en France, du moins.

On comprend que l'on pourrait agir autrement sur l'excitatrice,

soit en faisant varier, automatiquement ou non, la résistance de son circuit, soit en modifiant la vitesse de rotation : mais il n'y a pas eu d'essais tentés en grand dans ce sens :

522. Générateurs secondaires et transformateurs. — En supposant résolu pratiquement le problème de la distribution de l'électricité, il faut reconnaître que toutes les difficultés ne seront pas encore levées ; en effet, dans un même circuit, les divers appareils qui auront à utiliser le courant n'exigeront pas les mêmes conditions. Il pourra donc être nécessaire d'employer des *transformateurs* qui

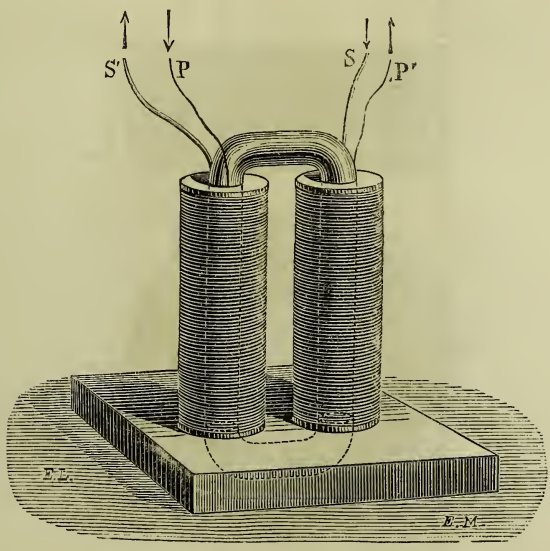


Fig. 399. — Transformateurs Zipernowsky. (*La Lumière électrique.*)

recevant un courant dans des conditions déterminées d'intensité et de différence de potentiel rendront, avec une certaine perte, nécessairement, un courant dans d'autres conditions : des appareils de divers modèles ont été imaginés ; nous signalerons le principe des deux systèmes principaux.

MM. Gaulard et Gibbs ont combiné, sous le nom de *générateur secondaire*, un appareil basé sur le principe des bobines d'induction et permettant d'obtenir, à l'aide d'une source unique d'électricité, une machine à courants alternatifs, des courants électriques de différents potentiels et distribués sur un nombre quelconque de points. Ce sont, en effet, de véritables bobines comprenant un

circuit inducteur, que l'on met en relation avec une machine à courants alternatifs, et un circuit induit. En faisant varier la longueur et la section de ces fils suivant les différents cas, on peut pour un même courant inducteur obtenir des courants induits variés. L'introduction d'un noyau de fer doux dans la bobine permet même de faire varier les effets obtenus entre certaines limites. Au début, le courant inducteur passait dans un fil de cuivre de 4^{mm} entouré parallèlement de 48 fils fins où se produisaient les courants induits, le tout formant un câble que l'on enroulait autour de la bobine. Depuis, les

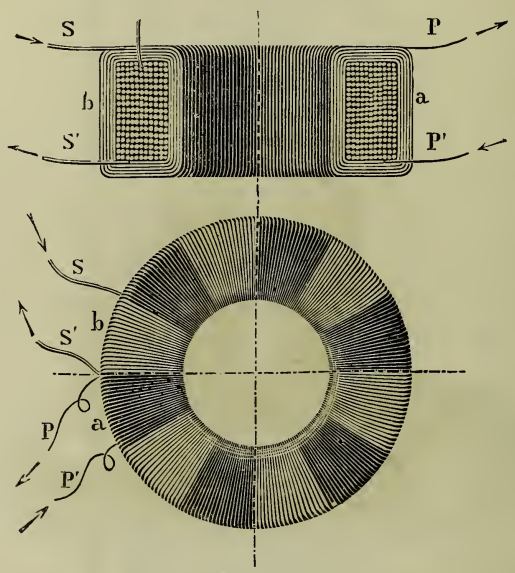


Fig. 400. — Transformateur Zipernowsky. (*La Lumière électrique.*)

bobines furent constituées par la superposition d'anneaux métalliques présentant une solution de continuité dont les bords sont munis de deux oreilles; ces disques annulaires sont séparés par des couches de matière isolante et réunis de deux en deux par ces oreilles, de manière à former deux circuits, l'un pour le courant inducteur, l'autre pour le courant induit (fig. 398).

MM. Gaulard et Gibbs ont imaginé un redresseur de courants qui permet de recueillir aux bornes de l'appareil des courants redressés au lieu des courants alternatifs qui sont obtenus.

Ces appareils ont été essayés à Londres et à l'Exposition de Turin : ils auraient produit, paraît-il, des rendements de 86 et

même 90 p. 100; ces chiffres semblent un peu élevés et il semble plus prudent de ne pas compter sur un rendement de plus de 80 p. 100, soit une perte de 20 p. 100, abstraction faite, bien entendu, des pertes qui ont lieu en dehors du transformateur.

MM. Zipernowsky, Déri et Blathy ont cherché à résoudre la même question, par des procédés un peu différents. Ils ont imaginé un système complet de distribution, mais nous n'avons à nous occuper que des transformateurs.

En principe, un transformateur comprend un noyau de fer doux (fig. 399) présentant la forme d'un cadre fermé sur lequel sont

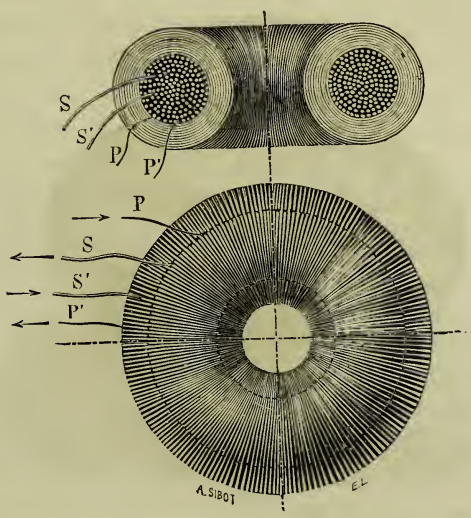


Fig. 401. — Transformateur Zipernowsky. (*La Lumière électrique.*)

enroulés alternativement les fils inducteurs P et les fils induits S. Il est préférable, pour éviter les courants de Foucault, d'employer du fil de fer pour constituer le noyau.

Une disposition qui paraît rationnelle ressemble à l'anneau de la machine Gramme, les sections de rang pair *a* étant couplées pour former le circuit inducteur P et les sections de rang impair *b* pour former le circuit induit S (fig. 400).

Dans un autre modèle, les fils inducteur P et induit S constituent le noyau en forme de tore et le fil de fer doux verni entoure ce noyau sur toute son étendue (fig. 401).

Dans le système de distribution les transformateurs sont montés en dérivation.

Il semble que les transformateurs soient appelés à rendre de réels services dans la distribution de l'électricité; ils commencent à être utilisés industriellement, l'expérience montrera par la suite le parti qu'il est possible d'en tirer.

523. Exemples de distribution d'électricité et de transport d'énergie. — Le système de distribution de M. Marcel Deprez a été appliqué à l'Exposition d'électricité de 1881; la génératrice était une machine Gramme, modifiée de manière à satisfaire aux conditions que nous avons indiquées précédemment; l'excitatrice était une petite machine Siemens. La disposition des fils avait pour effet

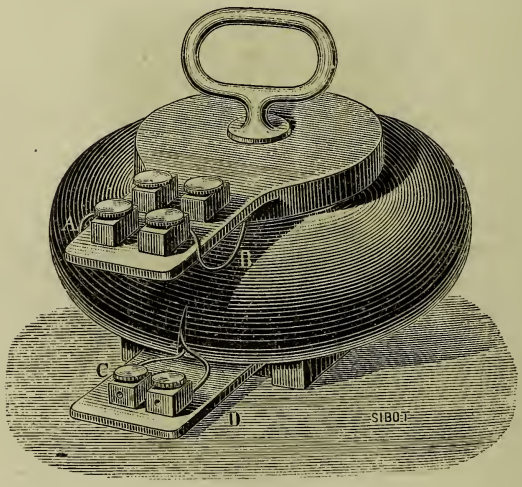


Fig. 402. — Transformateur Zipernowsky. (*La Lumière électrique.*)

de maintenir un potentiel constant; il y avait plusieurs dérivations sur lesquelles se trouvaient des appareils divers, des lampes, et des moteurs Deprez actionnant des instruments divers. Les résultats furent satisfaisants et on constata une indépendance réelle, sinon peut-être absolue entre les divers appareils; on pouvait à volonté interrompre ou faire fonctionner chacun d'eux sans influencer la marche des autres.

Des expériences du même genre furent reprises également par M. Marcel Deprez, mais avec des circuits d'une plus grande longueur, à Miesbach (57 kilom.), à Vizille (14 kilom.) et surtout au chemin de fer du Nord (57 kilomètres). Nous devons dire d'ailleurs que la question étudiée dans ces différents cas n'était pas tant

seulement la possibilité d'une distribution marchant avec régularité que celle du rendement que l'on peut espérer par ce mode de distribution de l'énergie. Nous reviendrons ultérieurement sur cette question.

Les solutions indiquées par M. Marcel Deprez ne sont pas les seules; il nous paraît inutile de traiter la question plus complètement et il importait surtout de montrer qu'elle est possible. Lorsque ce mode de distribution de l'énergie sera réellement entré dans la pratique, il y aura lieu d'étudier les meilleures dispositions à adopter. Sauf pour l'éclairage, et alors on se trouve en général dans des conditions relativement simples, nous ne pensons pas que d'ici quelque temps la distribution de l'énergie par l'électricité fonctionnera industriellement.

524. — En somme, si des essais sur le transport de la force ont été exécutés à diverses reprises depuis l'expérience de M. Fontaine en 1873, il n'y a eu d'applications réelles que dans un nombre de cas assez restreint, nullement, on peut le dire, dans le but d'utiliser des forces naturelles, du travail gratuit, mais pour satisfaire à certaines conditions particulières qui rendaient l'emploi de l'électricité commode. C'est ainsi que, en 1876, ce mode de transport de l'énergie fut utilisé à l'atelier de précision placé sous la direction du comité d'artillerie; le capitaine Manceron adopta ce moyen pour faire mouvoir une machine à diviser automatique très précise, puis une machine à diviser circulaire. Grâce à cette disposition les machines ont été mises absolument à l'abri des trépidations qui auraient résulté de la présence d'un moteur agissant directement ou relié matériellement à ces machines.

Plus tard, à la sucrerie de Sermaize, on utilisa à distance la force de la machine à vapeur de l'usine à faire fonctionner à distance une charrue (1500 mètres); pendant l'hiver, on se servit du même procédé pour décharger les bateaux chargés de betteraves.

Aux magasins de la Belle-Jardinière, un moteur qui est dans le sous-sol fait mouvoir par l'action de l'électricité une série de machines à coudre placées dans les étages supérieurs; une disposition analogue se rencontre aux magasins du Louvre.

Nous n'insisterons pas sur ces installations dont le nombre s'accroît, quoique lentement, non plus que sur quelques autres d'ordre différent que nous nous bornerons à signaler et qui présentent le caractère commun que, par suite des conditions particulières à chaque cas, le prix absolu du travail mécanique était d'importance secondaire, soit parce que l'électricité fournissait seule le moyen de

résoudre la question, soit parce que l'installation d'un moteur eût été très coûteuse.

C'est ainsi que l'électricité a été appliqué à la manœuvre d'un treuil à la gare des marchandises du chemin de fer du Nord. La génératrice, qui est une machine Gramme, est à 300 mètres environ du treuil et envoie le courant alternativement dans deux machines Siemens, l'une produisant le mouvement d'élévation, l'autre le mouvement de translation. La manœuvre de l'appareil est simple; la dépense correspondante ne paraît pas supérieure à celle qui résultait du travail à bras d'hommes et les opérations sont plus rapides.

Les ventilateurs qui ont été installés à l'École centrale et qui, agissant par aspiration sont placés dans les combles, reçoivent leur mouvement de machines dynamo-électriques auxquels on envoie le courant produit par une génératrice. On comprend quel est dans ce cas l'avantage de ce mode de transmission du travail et comment il eût été difficile et coûteux de transmettre le travail à ces appareils par des liaisons matérielles.

525. Expériences de Creil. — Donnons quelques détails sur l'installation de l'expérience faite par M. Marcel Deprez entre Paris et Creil.

A Creil la face motrice est fournie par une machine à vapeur de 200 chevaux. La machine génératrice est du modèle Gramme, modifiée par M. Deprez; elle contient deux anneaux dans deux champs magnétiques distincts constitués chacun par huit électro-aimants. Les électro-aimants sont en outre excités à part par une petite machine Gramme qui, à la vitesse de 1000 tours, développe une force électro-motrice de 210 volts, la résistance intérieure est de $1^{\text{ohm}},12$.

Le fil qui entoure chaque électro-aimant est divisé en galettes ou sections que l'on peut réunir à volonté en série ou parallèlement; le poids total d'un électro-aimant est de 485 kilogrammes, la longueur totale du fil de 56 495 mètres.

L'anneau induit est du genre Pacinotti ou Gramme : le fil qui le recouvre, d'une longueur de 12 012 mètres, est divisé en 231 sections correspondant à autant de lames du collecteur. Les balais peuvent être déplacés de manière à changer le calage, à volonté.

La génératrice qui est de très grande dimension, donne à sa vitesse normale une force électro-motrice de 7500 volts; sa résistance est de 20 ohms. Elle est reliée aux bornes d'où partent à Paris les circuits des réceptrices par deux conducteurs, un pour

l'aller, l'autre pour le retour, dont la résistance totale est de 106 ohms (distance de Paris à Creil, 56 kilomètres). A Paris, il y a deux circuits montés en dérivation et comprenant chacun une réceptrice qui doit recevoir un courant de 10 ampères.

Chaque réceptrice est analogue aux dimensions près à la génératrice; le champ magnétique est constitué par six électro-aimants seulement; la longueur totale du fil qui les recouvre est de 25380 mètres. Les anneaux induits sont plus petits, le fil qui les recouvre a une longueur de 5775^{m} par anneau. Enfin chaque réceptrice est animée, en outre, par une excitatrice dont la résistance intérieure est de $0^{ohm},420$ et susceptible de développer une force électro-motrice de 100 volts environ. Cette excitatrice prend son mouvements sur l'axe de la réceptrice et anime seule les inducteurs, tandis que le courant produit par la génératrice et amené par la ligne passe seulement dans l'anneau.

Nous passons sous silence les nombreux détails relatifs tant à ces machines qu'aux appareils accessoires, commutateurs, disjoncteur d'arrêt, etc. dont la description serait trop longue.

Les réceptrices doivent faire fonctionner à Paris des appareils très divers :

Des machines électriques destinées à l'éclairage;

Des pompes destinées aux manœuvres des appareils hydrauliques;

Des machines-outils diverses.

Au moment où nous écrivons, des expériences incomplètes ont eu lieu : les machines ont fonctionné, mais pendant un temps assez court, parce qu'un accident est venu produire l'arrêt. On ne sait encore si le système fonctionnera convenablement au point de vue pratique, si l'indépendance des divers appareils existera réellement, et on ignore quel sera le rendement.

526. Traction électrique des chemins de fer. — Une application particulièrement intéressante du transport du travail mécanique par l'électricité, est son emploi pour la traction sur les voies ferrées, chemins de fer ou tramways : c'est la maison Siemens et Halske qui a établi la première une transmission de cette espèce Théoriquement le problème est simple : le courant est produit par une génératrice à une station déterminée; la voiture qui doit se mouvoir, seule ou entraînant un train plus ou moins considérable, possède une réceptrice dont le mouvement se communique à des roues motrices par une transmission quelconque : lorsque le courant de la génératrice parvient à la réceptrice, celle-ci entre en action et fait tourner les roues motrices dont le mouvement de rotation pro-

duit le déplacement de la voiture. Mais la difficulté principale consiste dans la transmission du courant de la génératrice à la réceptrice, qui est montée sur la voiture en mouvement. Dans quelques cas, il existe entre les deux rails un rail central soutenu à quelque distance du sol par des supports isolants : ce rail est en communication à une extrémité avec la génératrice; d'autre part la voiture porte des brosses métalliques frottant sur ce rail et reliées métalliquement à la réceptrice, à laquelle elles transmettent le courant; le courant s'écoule par les rails ordinaires : telle est la disposition qui a été adoptée en 1881 sur le chemin de fer de Berlin à Lichtenfeld.

Pour le tramway électrique qui fut établi à Paris lors de l'Exposition d'électricité en 1881, la réceptrice communiquait à la génératrice par deux tubes de laiton soutenus en l'air par des supports isolants et présentant dans toute leur étendue une ouverture longitudinale; dans chacun de ces tubes glissait une sorte de navette métallique qui frottait contre les parois; chaque navette était reliée par un fil métallique isolé qui passait à travers la fente du tube et venait se fixer à l'une des bornes de la réceptrice; le courant arrivait par l'un des tubes et s'écoulait par l'autre. Ce procédé ne paraît pas très satisfaisant.

Dans une locomotive qui doit être utilisée à New-York sur le chemin de fer aérien, le courant est envoyé à la réceptrice montée sur la locomotive par un rail central isolé sur lequel roule un galet en bronze.

527. Telphérage. — Parmi les applications intéressantes qui paraissent destinées à acquérir une réelle importance, on peut citer le système de *telphérage* qui a été proposé par Fleeming Jenkin et qui après avoir été étudié par lui et par MM. Ayrton et Perry, vient d'être récemment appliqué à une exploitation industrielle à Glynde (Angleterre).

Le telphérage est un système de transport de wagonnets par l'électricité sans aucun personnel sur les véhicules ni sur la voie. Pour diverses raisons faciles à comprendre et qui ne dépendent pas des conditions électriques, on a adopté des wagonnets suspendus à un rail ou cable d'acier soutenu en l'air par des poteaux isolants; les wagonnets sont réunis de manière à former un train comprenant une locomotive électrique; le rail qui sert de support au train est également utilisé pour la transmission du courant.

En réalité il y a deux lignes parallèles (fig. 403) servant l'une pour la marche dans un sens, l'autre pour la marche en sens opposé; mais par suite d'une ingénieuse disposition, ces deux voies sont dis-

posées de manière à éviter l'emploi de fil de retour pour le courant. A cet effet, chaque voie est composée de sections égales séparées entre elles par de petits intervalles et que nous désignerons pour l'une des voies par 1, 2, 3... et pour l'autre par 1′, 2′, 3′... ; chacune des sections d'une voie est reliée à ses extrémités aux deux sections voisines de l'autre voie, de telle sorte que l'on a deux conducteurs continus, mais complètement séparés, isolés, et communiquant chacun avec une des bornes d'une génératrice M ; par exemple la borne positive sera en communication avec le conducteur 12′34′5... tandis que la borne négative sera reliée avec le conducteur 1′23′45′..... ; mais il ne s'établit pas de courants parce que le circuit n'est fermé nulle part.

D'autre part les trains sont formés d'une série de wagonnets liés les uns aux autres de manière à présenter entre les roues extrêmes une longueur précisément égale à une section du conducteur, de

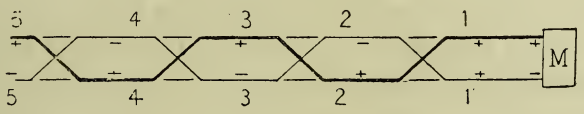


Fig. 403.

telle sorte que les roues extrêmes sont nécessairement toujours sur deux sections contiguës, sauf le temps très court où elles passent ensemble sur les espaces qui existent entre les sections et où se trouvent des supports isolés complètement et de faible longueur. Les roues des wagonnets sont isolées ; la première et la dernière du train sont reliées par des fils aux bornes du moteur qui occupe le milieu du train. Quand un train est sur la ligne il réunit donc nécessairement deux sections appartenant aux deux conducteurs et ferme le circuit ; le courant s'établit, le moteur fonctionne, ses roues tournent, il se meut, entraînant le train tout entier. Quand les roues extrêmes arriveront aux espaces qui séparent les sections le courant cessera pendant un instant, mais le système continuera à se mouvoir en vertu de la vitesse acquise et atteindra bientôt les sections voisines : le courant se rétablira donc dans le moteur, en sens contraire de ce qu'il était précédemment ; mais ce renversement ne change pas le sens de la rotation du moteur parce qu'il se produit à la fois dans l'anneau et dans les inducteurs ; le mouvement se continuera donc.

Il importe de remarquer que l'on peut installer sur la ligne simul-

tanément plusieurs trains; cela revient, en somme, à établir plusieurs dérivations; ce qui conduit à établir la génératrice de manière à obtenir une différence de potentiel constante aux bornes.

Pour des trains de même poids, la vitesse dépendra de la voie, suivant qu'elle sera droite ou courbe, en palier, en pente ou en rampe; pour être assuré que les trains qui se succèdent ne se rencontreront pas on a adapté au moteur un régulateur à force centrifuge, disposé de manière à interrompre le circuit si la vitesse est supérieure à la vitesse moyenne.

Les détails de ce système ont été très bien étudiés, il est inutile de les décrire ici; nous nous bornerons à ajouter que le telphérage établi à Glynde fonctionne d'une manière satisfaisante; il faut reconnaître que son installation est récente et qu'on ne peut encore déduire de ces premiers essais une conséquence certaine.

528. Rendement dans la transmission de l'énergie par l'électricité. — Si dans un nombre limité de cas la transmission de l'énergie par l'électricité est appelée à rendre de réels services à cause de circonstances spéciales, la question ne prendra un intérêt véritable au point de vue économique que si ce mode de transport est d'un bas prix, si le rendement qu'il est susceptible de fournir n'est pas trop faible, car nous avons signalé que s'il existe des forces gratuites, leur captation, pour ainsi dire, leur utilisation correspondait à une certaine dépense et que, même au point de départ, le travail à transmettre a une certaine valeur.

Un élément important de ce rendement est dans la distance à laquelle la transmission doit se faire; car s'il est vrai (509) que, en modifiant les conditions d'une machine on peut arriver à obtenir un rendement *électrique* indépendant de la distance, comme l'a dit M. Marcel Deprez, en réalité une machine donnée pour maintenir ce rendement constant doit transmettre une quantité de travail d'autant moindre que la distance est plus grande. Il en résulte que comme il faut tenir compte des dépenses afférentes à la machine, prix d'achat, amortissement, frais d'entretien, le prix de l'unité de travail recueilli à l'extrémité de la ligne augmente avec la distance; à plus forte raison si l'on tient compte de la dépense d'achat et d'installation de la ligne, dépense qui est loin d'être négligeable si la quantité d'énergie à transmettre est notable et c'est évidemment ce seul cas qui est intéressant au point de vue industriel.

Il faut reconnaître que les données que nous possédons sur ce sujet sont encore bien incomplètes : elles peuvent se résumer ainsi.

Dans des expériences faites à Munich (1881), Schuckert recueil-

lait 38 kilogrammètres tandis que, au point de départ à 5 kilomètres le travail fourni était de 75 kilogrammètres (?) ce qui représente un rendement de 54 p. 100.

Dans les essais faits à Munich-Miesbach (1882), sur une longueur de 57 kilomètres, M. Marcel Deprez a calculé des rendements électriques d'après le rapport du nombre de tours de la réceptrice et de la génératrice et il a trouvé des rapports variant de 46 à 68 p. 100; mais outre qu'il s'agit non du rendement électrique mais du rendement industriel, nous avons dit que le rapport du nombre de tours n'avait de signification précise que dans des cas très déterminés qui ne sont presque jamais réalisés.

Plus tard, en 1883, de nouvelles expériences eurent lieu au chemin de fer du Nord : les machines génératrice et réceptrice étaient à Paris reliées d'une part par un fil court et de l'autre par un fil allant passer au Bourget, d'une longueur de 17 kilomètres et d'une résistance de 160 ohms : il y a lieu de faire quelques réserves sur cette disposition *en boucle* qui ne reproduit pas les conditions de la pratique. Le travail moteur fut de 6,21 chevaux en moyenne; le travail recueilli au frein fut de 2,03, soit un rendement de 32,5 p. 100.

Dans une autre série le rendement atteignit 36,2 p. 100 et même exceptionnellement, il est vrai, 41,1; on ne peut évidemment compter sur ce dernier chiffre.

Enfin d'autres expériences eurent lieu entre Grenoble et Vizille à une distance de 14 kilomètres; le rendement a atteint des valeurs beaucoup plus considérables, puisque l'on a donné pour une expérience le nombre 62,3 p. 100; ce nombre paraît supérieur à ce que l'on pouvait atteindre : le rendement électrique ayant été évalué à 70,8 il semble que la valeur du rendement industriel soit trop grande notablement. Les expériences, en tous cas, ont montré d'une manière générale que le rendement croît avec la vitesse de rotation de la génératrice.

En résumé, on ne possède aucune donnée *précise* sur le rendement effectif sur lequel on pourrait compter dans le cas d'une application vraiment industrielle. Il y a là un doute qui est préjudiciable au développement de l'industrie électrique.

Il faut attendre les résultats que donneront les essais en cours et notamment les expériences de Creil avant d'être fixé sur le développement immédiat que peut prendre cette intéressante application, la distribution de l'électricité.

CHAPITRE IV

SYSTÈMES TÉLÉGRAPHIQUES ET TÉLÉPHONIQUES

529. — Presque toutes les applications des courants qui ont été proposées et essayées, jusqu'à ces dernières années, avaient pour but d'utiliser la rapidité extrême de transmission de l'électricité; seules, la galvanoplastie et les opérations analogues mettaient à profit l'énergie que ces courants peuvent transporter d'un point à un autre. Nous avons vu dans les chapitres précédents qu'il n'en est plus ainsi : mais les cas dans lesquels c'est surtout la quasi-instantanéité des actions qui intervient sont très nombreux et très nombreux les appareils qui, dans des buts divers, sont construits pour utiliser cette propriété. Nous ne saurions avoir la pensée de décrire tous ces appareils qui ont été imaginés dans les buts les plus variés; il faut dire d'ailleurs que dans un très grand nombre de cas l'action de l'électricité est très simple et se réduit à produire à distance un enclenchement ou un déclenchement et que ce qui différencie les appareils, ce sont les dispositions mécaniques qui sont combinées en vue de produire une action déterminée après que le déclenchement a été obtenu; ces dispositions sont extrêmement ingénieuses, mais elles n'ont aucun rapport avec l'électricité. Aussi ne donnerons-nous que quelques appareils les plus usités et qui pourront servir à faire comprendre des dispositions analogues dont on trouverait la description dans des publications spéciales.

Il est un groupe étendu d'appareils qui, très différents dans leurs dispositions, ont cependant un but commun, celui de permettre de transmettre à distance une idée, une volonté; ce sont les sonneries, les télégraphes, les téléphones et une série d'appareils tels que ceux usités pour l'exploitation des chemins de fer; nous nous en occuperons d'abord, réservant pour un autre chapitre les appa-

reils qui sont destinés à enregistrer des phénomènes, à transmettre à distance des indications automatiques relatives à une action déterminée, etc.

530. Sonneries électriques. Trembleuses. — Le courant électrique est employé dans un grand nombre de circonstances à faire mouvoir des sonneries; tantôt ces sonneries frappent un coup ou un nombre déterminé de coups; tantôt elles produisent un tintement continu tant que le courant passe, elles sont alors dites *trembleuses;* quelquefois enfin, elles doivent suivant les circonstances agir comme trembleuses ou frapper un seul coup. Nous nous occu-

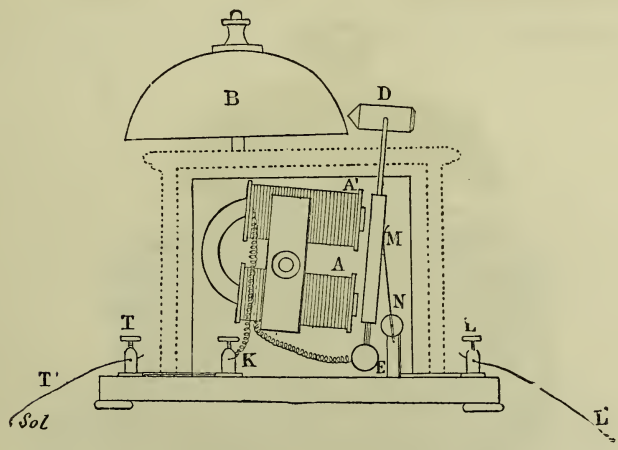


Fig. 404. — Sonnerie électrique.

perons d'abord des trembleuses qui sont de beaucoup celles dont l'usage est le plus général.

Les sonneries trembleuses sont toujours construites sur le principe de l'interrupteur de Neef (198); voici la disposition ordinaire : devant un électro-aimant AA′ (fig. 404) se trouve à quelque distance un morceau de fer doux M qui est porté par une lame de ressort maintenue fixe à une de ses extrémités E. Le fer doux vient presser contre un ressort N qui communique à la borne L et à l'un des pôles de la pile. Le fer doux porte d'autre part, à l'extrémité d'une tige métallique, diversement recourbée suivant les modèles, le marteau D destiné à servir de frappeur. Le fil de l'électro-aimant aboutit d'une part à la borne K et par suite à la pile (ou au sol) et à l'autre extrémité au fer doux en E. Le fonctionnement de cet appareil est absolument le même que celui de l'in-

terrupteur de la bobine d'induction. Lorsque le circuit vient à être fermé, le courant passe, l'électro-aimant devient actif, le fer doux est attiré; mais alors le fer doux quitte le ressort N, ce qui rompt le circuit et fait cesser le courant; l'électro-aimant cesse d'être actif et, par l'élasticité du ressort, le fer doux est ramené en arrière. Mais ce mouvement ferme de nouveau le circuit et, dès lors, le même effet se reproduit et continue, tant que l'on n'a pas produit en un point du circuit une rupture qui arrête définitivement le courant.

En face du marteau et à quelque distance est placé le timbre B

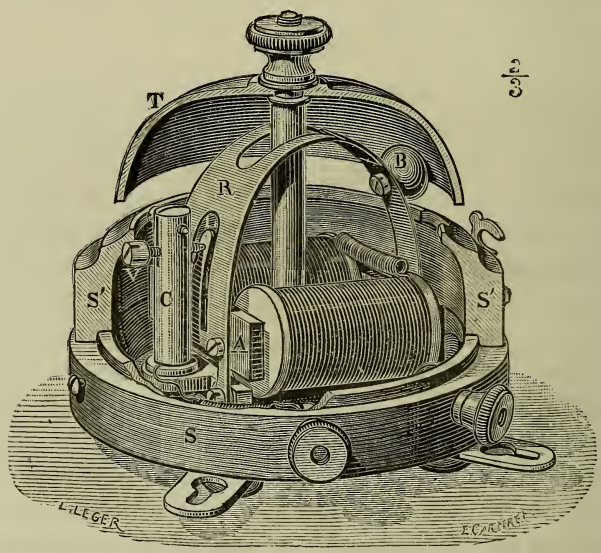


Fig. 405. — Sonnerie de Redon. (*La Lumière électrique.*)

sur lequel il doit frapper; la distance doit être telle que lorsque le fer doux est attiré par l'électro-aimant il ne touche pas le timbre, mais qu'il en soit séparé par un petit intervalle. Lors du fonctionnement de la sonnerie, le marteau arrive au contact en vertu de sa vitesse acquise et de l'élasticité de son support; mais le contact est très bref, ce qui rend le son clair, il serait au contraire un peu étouffé si la disposition était autre.

Le timbre peut avoir naturellement des formes et des dimensions variées; il y a lieu surtout d'employer divers modèles si plusieurs sonneries sont placées dans le voisinage. Quelquefois on remplace

le timbre métallique par une clochette en bois dur, en gaïac, par exemple : il se produit alors un tintement très distinct, mais moins bruyant. Dans quelques circonstances même, on supprime complètement le timbre et le marteau : le mouvement du trembleur produit un bruit suffisant pour appeler l'attention.

Le plus souvent les diverses pièces sont montées sur un même support métallique que l'on accroche verticalement à un mur, le timbre dirigé à la partie inférieure ; une petite caisse munie d'ouvertures convenablement disposées recouvre le mécanisme, à l'exception du timbre et du marteau, et le met à l'abri de la poussière.

531. — M. de Redon a modifié la forme des sonneries et a construit un modèle ingénieusement disposé (fig. 405) : le système est tout

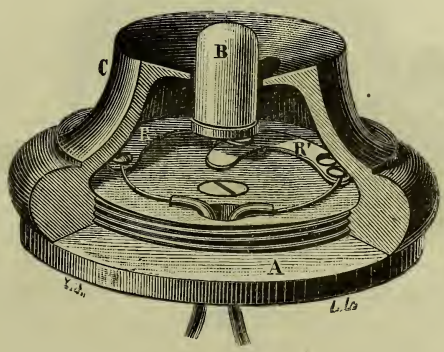


Fig. 406. — Bouton d'appel. (*La Lumière électrique.*)

entier recouvert par le timbre hémisphérique T qui sert ainsi d'enveloppe ; d'autre part, le marteau B au lieu d'être porté par une tige rectiligne est attaché à un ressort de forme demi-circulaire R qui convient spécialement à la place qu'il a à occuper à l'intérieur du timbre ; le fer doux A est placé perpendiculairement à la longueur du ressort. Cette sonnerie dont il existe des modèles de grandes dimensions fonctionne également bien dans toutes les positions.

532. — L'installation d'une sonnerie susceptible d'être actionnée d'un seul seul point, ne présente aucune difficulté ; la sonnerie doit être intercalée dans un circuit comprenant également une pile et présentant une interruption au point où doit se faire l'appel : tant que le circuit restera ouvert, le courant ne passera pas et la son-

nerie restera silencieuse; elle entrera en action lorsque l'on fermera le circuit et fonctionnera aussi longtemps que le contact sera maintenu.

Donnons quelques détails sur cette installation.

La pile est généralement constituée par des éléments Leclanché; 4 éléments suffisent dans la plupart des cas. La pile peut servir pendant plusieurs années dans le cas d'un service ordinaire; si elle cesse de fonctionner, il suffit le plus souvent d'y ajouter de l'eau pour remplacer le liquide qui a disparu par évaporation.

Le circuit est constitué par du fil de cuivre ayant environ 1 millimètre de diamètre et recouvert d'une couche isolante, soie ou coton; la pose ne présente aucune difficulté et il n'y a pas lieu de s'y arrêter. Nous dirons seulement que souvent il est inutile d'installer un circuit complet : on peut relier l'un des pôles à un tuyau

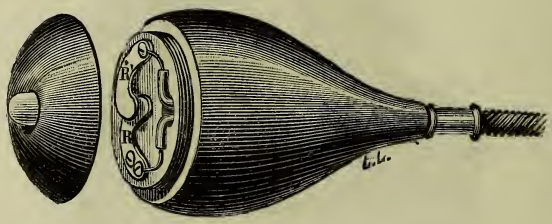


Fig. 407. — Poire à appel. (*La Lumière électrique.*)

d'eau ou de gaz et fermer le circuit d'autre part sur le même tuyau.

Il y a également à signaler les dispositions adoptées pour fermer le circuit lorsque l'on veut produire un appel, on peut évidemment employer les dispositions les variées et nous ne décrirons que quelques-uns des modèles que l'on rencontre le plus souvent.

Le modèle le plus employé est certainement le bouton d'appel : il est constitué par une plaque circulaire isolante A (fig. 406) sur laquelle sont fixées deux lamelles métalliques R, R′ communiquant chacune avec une partie du circuit. L'une de ces lamelles R′ est posée à plat, l'autre R est fixée à une extrémité et, formant ressort, se soulève d'autre part, de manière qu'elle ne touche pas la lamelle R′; le tout est recouvert d'un couvercle circulaire isolant C présentant au centre une ouverture dans laquelle pénètre un bouton en ivoire B qui, renflé intérieurement, ne peut sortir et qui est pressé par la lamelle faisant ressort. Lorsque l'on appuie sur le bouton, on repousse le ressort R et l'on établit le contact ce qui fait agir la son-

nerie. Le courant cesse lorsque l'on abandonne le bouton qui reprend sa place en même temps que la lamelle mobile s'écarte de la lamelle fixe.

Ce modèle peut être varié de bien des façons, c'est ainsi qu'il peut agir par l'intermédiaire d'un cordon de tirage comme lorsqu'il s'agit d'une sonnette ordinaire (fig. 408). Dans ce cas une tige cylindrique est reliée à ce cordon : elle porte une traverse métallique qui, en descendant, ferme le circuit en pressant contre deux lames métalliques légèrement courbées. Un ressort ramène cette

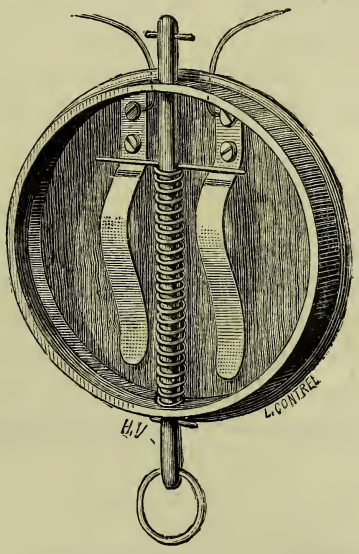


Fig. 408. — Appel à tirage. (*La Lumière électrique.*)

tige cylindrique et le cordon de tirage à leur position de repos lorsque l'on cesse d'agir sur celui-ci.

On établit des contacts qui fonctionnent comme les boutons de sonnette de porte; d'autres qui agissent par l'action d'une pédale; d'autres qui fonctionnent lorsque l'on fait mouvoir une porte. Toutes ces dispositions et bien d'autres ne présentent aucune difficulté à concevoir ou à établir : il s'agit d'établir un système qui, à volonté, maintienne le circuit ouvert ou qui le ferme.

Nous signalerons d'autre part des modèles spéciaux dans lesquels les pièces qui servent à l'appel sont utilisées pour d'autres usages, notamment comme avertisseurs d'incendies.

533. Installation d'un système de sonneries. — Un certain

nombre de problèmes se présentent lorsqu'il s'agit d'établir non une sonnerie, mais un système de sonneries répondant à divers besoins. Nous allons en indiquer quelques-uns, mais sans insister, la disposition se comprenant immédiatement en général à la simple inspection des figures.

1° On peut, à l'aide d'une seule pile P (fig. 409), actionner diverses

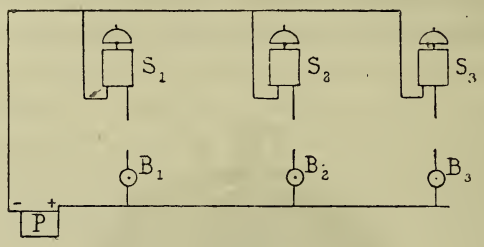


Fig. 409.

sonneries correspondant chacune à un bouton d'appel unique. Dans ce cas, les divers circuits, comprenant chacun une sonnerie S et un bouton B, sont montés en dérivation sur la pile.

2° Un autre cas qui se présente souvent consiste à pouvoir actionner une même sonnerie S (fig. 410) par divers boutons d'appel, B_1, B_2.... ; ce sont alors les circuits comprenant chacun un bouton

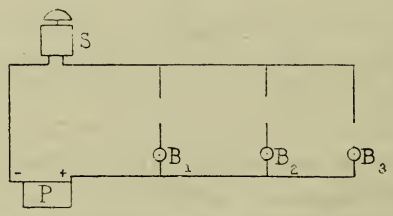


Fig. 410.

qui sont montés en dérivation sur le circuit principal où se trouvent la pile et la sonnerie.

Dans ce cas, il est clair que la sonnerie ne peut indiquer de quel point a été fait l'appel, à moins que l'on ne convienne d'un mode de tintement particulier correspondant à chacun des boutons. C'est alors une télégraphie élémentaire, télégraphie que l'on peut étendre d'ailleurs en donnant à l'avance des sens déterminés à divers modes

de tintements, ce qui est d'un usage très simple et très commode au point de vue domestique.

Lorsqu'il n'y a que deux boutons d'appel, on peut aisément établir une distinction en introduisant dans l'un des circuits une assez forte résistance qui affaiblira le courant correspondant et donnera naissance à un tintement peu intense et très reconnaissable.

Lorsqu'il est nécessaire de distinguer, parmi un grand nombre de points, celui d'où est parti l'appel, il faut employer des tableaux avertisseurs (535).

On peut disposer la sonnerie de manière à frapper un seul coup chaque fois que l'on appuie sur le bouton. Il suffit pour cela que, au lieu de la disposition générale que nous avons indiquée (fig. 411), le fil de l'électro-aimant aboutisse directement par ses deux extrémités H et I (fig. 412) au circuit qui contient la pile P et le bouton

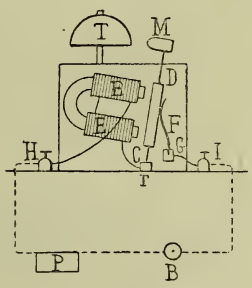


Fig. 411.

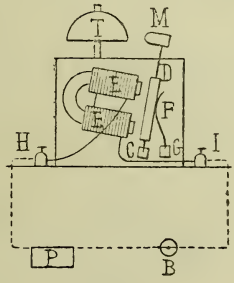


Fig. 412.

d'appel B. Lorsqu'on appuie sur celui-ci le courant passe, le fer D est attiré et le marteau M frappe le timbre ; mais l'attraction subsiste tant que le courant passe pour cesser quand on n'appuie plus sur le bouton d'appel ; à ce moment, le marteau qui était resté immobile reprend sa position de repos. On aura donc un coup et un seul chaque fois que l'on pressera sur le bouton d'appel.

534. — Il est possible d'installer la sonnerie de manière à correspondre par deux circuits en dérivation à deux boutons d'appel B_1 et B_2 (fig. 413), de telle sorte que la manœuvre de l'un donne un coup et la manœuvre de l'autre un tintement continu. Il suffit de joindre aux bornes ordinaires H et K une troisième borne I qui soit reliée directement au support C du fer doux D ; en mettant la borne H à la pile et les bornes I et K dans deux circuits distincts, on voit aisément que celui qui aboutit à la borne I donne un coup et celui qui aboutit à K produit un tintement continu.

Enfin on peut installer une sonnerie dont l'action lorsqu'elle a commencé se continue jusqu'à ce que l'on ait agi sur un commutateur, lors même que l'on cesse de presser le bouton d'appel. On emploie une sonnerie à trois bornes (fig. 414) comme la précédente; mais, au repos l'armature mobile D ne touche pas le ressort F. La borne H est reliée directement à la pile, cette communication ne produit aucun effet puisque le courant ne passe pas. Mais on installe une dérivation sur ce circuit, dérivation aboutissant à la borne I et contenant le bouton d'appel B; lorsque l'on presse sur le bouton d'appel, le marteau est attiré et reste attiré tant que le bouton reste appuyé; mais lorsqu'on l'abandonne le marteau revient en arrière et, dépassant sa position d'équilibre en vertu de la vitesse acquise, arrive toucher le ressort F; à partir de cet instant,

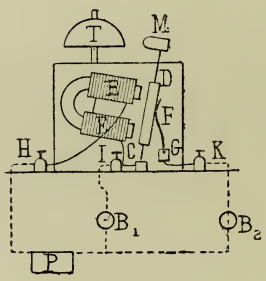


Fig. 413.

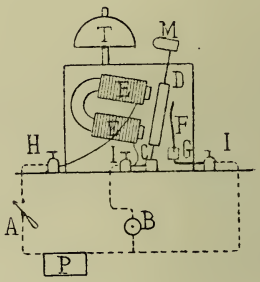


Fig. 414.

la sonnerie agit comme une trembleuse ordinaire et le tintement continue jusqu'à ce que, à l'aide d'un commutateur A placé en un point quelconque du circuit, on vienne interrompre le courant, ce qui ramène le marteau à sa position de repos où il restera jusqu'à ce que l'on presse de nouveau sur le bouton d'appel.

On peut avoir plusieurs sonneries qui entrent à volonté en action sous l'influence d'un seul bouton d'appel; la disposition générale à adopter est celle de la figure 415, un commutateur A établit le contact sur telle ligne que l'on veut. On rencontre fréquemment des cas dans lesquels cette disposition est commode.

Il est inutile d'insister sur les dispositions variées que l'on peut réaliser et qu'il sera facile de comprendre ou d'obtenir.

Nous avons indiqué dans les figures qui précèdent les dispositions schématiques des communications à établir; dans la pratique, tout en conservant les mêmes modes de liaison on s'efforcera de disposer

les fils de manière à réduire autant que possible la longueur du circuit.

On emploie également d'autres appareils destinés à produire des sonneries, mais dans lesquels le mouvement du marteau est produit

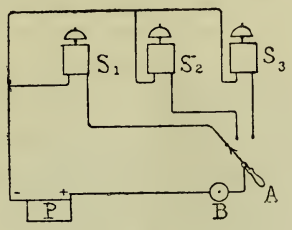


Fig. 415.

par un mécanisme d'horlogerie et où le courant sert à produire uniquement le déclenchement du mécanisme.

535. Tableaux indicateurs. — Lorsqu'un appel doit pouvoir être fait de plusieurs point distincts, on emploie avantageusement une

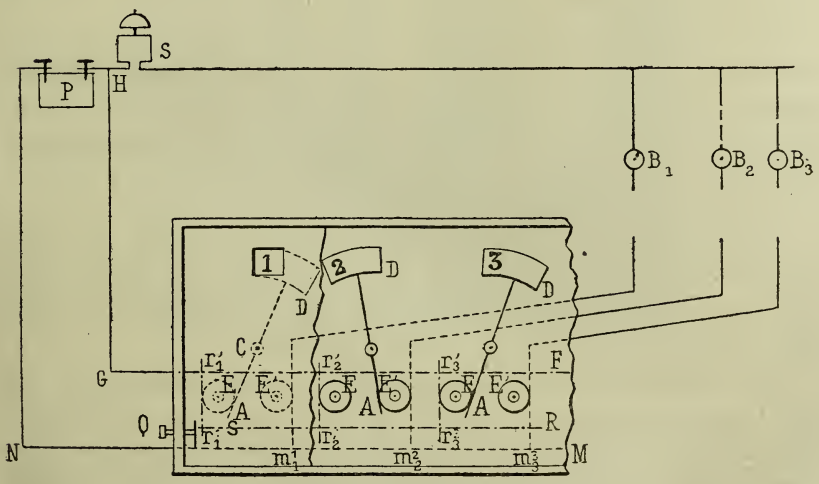


Fig. 416. — Tableau indicateur.

sonnerie unique avec tableau indicateur. La sonnerie appelle l'attention; le tableau indicateur fait savoir de quel point l'appel a été fait : à cet effet, il comprend (fig. 416) une plaque opaque munie d'ouvertures, lorsqu'un appel est fait une indication apparaît

derrière l'une des ouvertures, indication faisant connaître le point qui a provoqué la sonnerie.

Indiquons d'abord comment cette indication peut apparaître dans une ouverture : derrière chaque ouverture se trouvent deux électro-aimants E, E′ entre lesquels est une armature en fer doux A mobile autour d'un axe C; elle se prolonge au delà de cet axe et porte une carte D sur laquelle on a inscrit, un chiffre, un nom ou un signal convenu à l'avance. Lorsque l'armature est inclinée d'un côté, l'inscription est masquée derrière la plaque opaque; lorsqu'elle bascule de l'autre côté l'inscription apparaît à l'ouverture correspondante. Le mouvement de bascule se produit sous l'influence d'un courant qui traverse l'électro-aimant dans un sens convenable pour produire la répulsion de l'armature : pour ramener l'armature à sa position primitive et faire disparaître l'inscription, il suffit de faire passer un courant dans l'autre électro-aimant.

Lorsqu'il y a plusieurs ouvertures au tableau, on installe autant d'appareils qu'il y a d'ouvertures, chaque appareil se trouvant dans un circuit comprenant le bouton d'appel correspondant, en dérivation sur la pile P et la sonnerie S. Lorsque l'on appuie sur un des boutons d'appel, la sonnerie entre en action et l'indication apparaît à l'ouverture qui lui correspond.

Pour faire disparaître cette indication, on a établit un autre circuit dérivé H G F monté sur la pile et comprenant tous les électro-aimants de gauche. Au repos ce circuit est interrompu en *r*, et n'est pas traversé par le courant; on ferme le circuit en appuyant sur un bouton Q, ce qui ramène à leur position de repos toutes les armatures qui en étaient dérangées.

On peut combiner cette disposition avec une de celles que nous avons indiquées plus haut et obtenir que la sonnerie continue tant que l'on n'est pas venu appuyer sur un bouton qui produit le double effet d'arrêter la sonnerie et d'effacer le signal.

536. Sonneries magnéto-électriques. — Les sonneries et les avertisseurs que nous venons de décrire et qui sont d'un emploi très fréquent et très commode présentent l'inconvénient de fonctionner sous l'influence de courants continus et par suite d'exiger l'usage de piles dont l'entretien, bien que facile, exige cependant une certaine surveillance et entraîne à quelques dépenses. Aussi, à plusieurs reprises, a-t-on cherché à utiliser, pour ces sonneries en particulier, les courants induits produits par l'action des aimants permanents : on a imaginé divers modèles d'appareils qui ont donné de bons résultats. Nous décrirons seulement un des modèles

qui fait partie d'ailleurs d'un système général de communications téléphoniques. Le transmetteur est dérivé d'un appareil construit par M. Abdank-Abakanowicz et a été perfectionné par M. Marcel Deprez. Il est constitué par deux aimants en U placés parallèlement à quelque distance, les pôles opposés en regard (fig. 417); entre ces aimants se trouve suspendue à un ressort une bobine dont les extré-

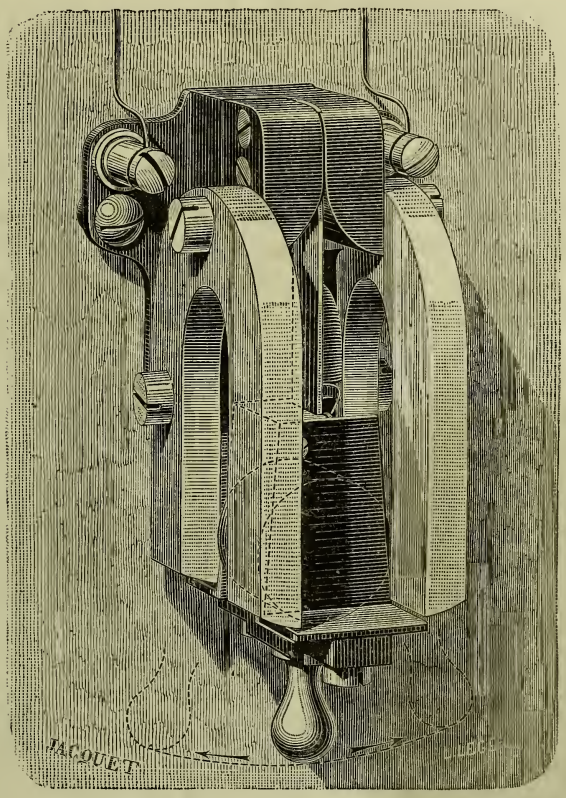


Fig. 417. — Sonnerie magnéto-électrique. (*La Lumière électrique.*)

mités des fils sont reliées aux fils de ligne. Lorsqu'on l'écarte de la position médiane qu'elle occupe à l'état de repos, elle passe entre les pôles des aimants et, abandonnée à elle-même, oscille un certain nombre de fois. Le noyau de la bobine (fig. 418) est creux et est relié à des joues en fer largement épanouies et recourbées qui, dans les mouvements de la bobine restent très près de l'aimant. Ces mouvements provoquent des courants dans le circuit, courants alternatifs, bien entendu.

Par une disposition spéciale, le circuit reste ouvert lorsque la sonnerie ne fonctionne pas, et se ferme lorsqu'on met l'appareil en train. A cet effet l'un des fils de la bobine (fig. 419) communique directement à la ligne et l'autre à la tige de suspension qui est portée

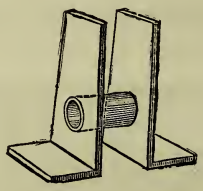


Fig. 418.

par une pièce isolante : mais la ligne est reliée d'autre part à une pièce métallique isolée à laquelle sont fixées deux lames de ressort r, r' qui, au repos, sont maintenues très proches de la tige de suspension mais sans la toucher, de telle sorte que le circuit est

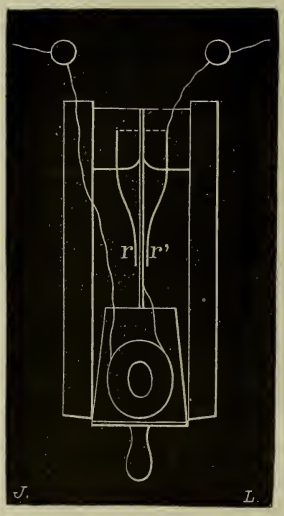


Fig. 419.

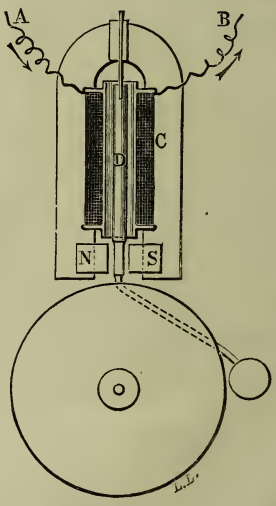


Fig. 420.

interrompu. Lorsque la bobine oscille, le contact s'établit constamment d'un côté ou de l'autre et le courant peut passer.

Il existe diverses formes de récepteur, de sonnerie à proprement parler. Voici le principe : une bobine C (fig. 420) qui est reliée à la ligne est suspendue devant un aimant. Son noyau D se pro-

longe et forme une palette qui est située entre deux pièces polaires N. S. reliées à l'aimant et au delà, par l'intermédiaire d'une tige élastique, porte le marteau. Lorsque la bobine est traversée par des courants alternatifs, comme ceux qui sont fournis par le transmetteur précédemment décrit, la palette s'aimante et prend alternativement des polarités opposées : elle prendra donc un mouvement oscillatoire entre les pièces polaires et il se produira un tintement.

On a pu construire des tableaux indicateurs dans lesquels les effets sont produits par ces courants alternatifs de manière à constituer un système complet d'appel.

537. — Cloches Leopolder. — Parmi les appareils qui servent à transmettre des signaux conventionnels, il convient de signaler les cloches Leopolder qui sont employées par un assez grand nombre de compagnies de chemins de fer françaises et étrangères pour l'exploitation des sections à voie unique.

Dans ces appareils, le courant sert seulement à produire un déclenchement et n'agit pas directement. Le marteau qui frappe sur un timbre de grand diamètre est mû par un rouage d'horlogerie à poids; celui-ci est sous la dépendance d'un arrêt mû par l'action d'un électro-aimant. Tant que le courant passe, le rouage est maintenu immobile; s'il est interrompu, puis rétabli, le déclenchement se produit, le rouage tourne et le marteau frappe un coup, puis revient au repos. Il suffit donc, pour envoyer d'une station à une autre des signaux convenus représentés par des groupes de coups de cloche, d'avoir à la station qui transmet un interrupteur quelconque; on y joint un galvanomètre qui permet de s'assurer si le courant passe régulièrement.

On emploie des courants continus agissant par interruption, plutôt que des appareils où le fonctionnement serait produit par le passage de courants de courte durée, afin d'éviter les erreurs qui, dans ce cas, pourraient résulter de la production d'un courant sous l'influence de perturbations atmosphériques.

538. Principes généraux des télégraphes. — Considérons une pile quelconque dont les pôles communiquent avec le sol par l'intermédiaire de fils conducteurs d'une longueur absolument quelconque; par suite de la différence de potentiel qui s'établit entre le sol et les pôles de la pile, le fil est parcouru par un courant qui va de la terre au pôle négatif, d'une part et, d'autre part du pôle positif à la terre. En tous les points de ce fil, quelle que soit sa longueur, on peut observer les effets que le courant est susceptible de produire : il peut

se manifester, par exemple, des effets chimiques ou bien si le courant traverse un électro-aimant, celui-ci devient actif et peut attirer un morceau de fer doux. Mais si, en un point quelconque du conducteur on établit une interruption, le courant cesse et avec lui cesse aussi l'effet que l'on observait; cet effet se manifestera de nouveau quand on aura rétabli la communication.

On conçoit que des relations puissent s'établir entre le point où on produit les ruptures et les fermetures du circuit et celui où l'on observe les effets, et cela, quelque grande que soit la distance qui sépare ces deux points : il suffira de dispositions mécaniques ou de conventions adoptées à l'avance pour qu'il soit possible d'établir ainsi des communications transmettant des lettres, des mots et des phrases; c'est là ce qui constitue un système télégraphique.

Un système télégraphique comprend donc nécessairement un conducteur unissant les deux stations et se terminant à la terre à ses deux extrémités et que l'on désigne sous le nom de *ligne*. A l'une

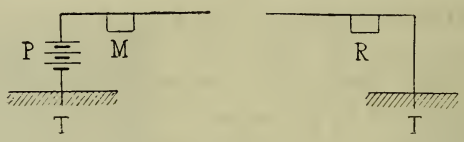


Fig. 421.

des stations se trouve un appareil destiné à produire les ruptures et fermetures du circuit, c'est le *transmetteur* ou *manipulateur* M (fig. 426) à l'autre station on dispose un appareil où se manifestent les effets produits par les variations de courant, c'est le *récepteur* R. Enfin, sur le trajet du conducteur, en un point de la ligne est intercalée la pile P, source du courant; la position de la pile pourrait être quelconque; en réalité, elle est toujours à l'une des stations, généralement à celle où est le transmetteur; bien que, à la rigueur, il ne soit pas impossible de substituer une machine à la pile, cette substitution n'est pas usitée, au moins en France.

Les différents systèmes sont caractérisés par la nature des signaux produits par le récepteur, d'abord; puis par les dispositions mécaniques ou autres adoptées pour le transmetteur et pour le manipulateur. Nous décrirons les principaux types de systèmes télégraphiques qui sont usuellement adoptés : mais avant d'entrer dans le détail, nous aurons à nous occuper de quelques dispositions géné-

rales que l'on retrouve ou que l'on peut retrouver quel que soit le système adopté.

539. — L'installation d'un bureau télégraphique doit satisfaire à certaines conditions générales indépendantes de la nature des appareils employés : nous laissons de côté pour l'instant le cas des appareils multiples qui sont en usage sur les lignes très chargées et dont nous parlerons ultérieurement.

Les dépêches ne sont pas expédiées toujours dans le même sens et chaque bureau doit pouvoir envoyer ou recevoir une dépêche; il doit donc y avoir un récepteur et un transmetteur, et normalement chaque bureau doit être prêt à recevoir une dépêche, comme il doit pouvoir en envoyer une. Il faut de plus que le bureau soit prévenu lorsqu'une dépêche va lui être expédiée; à cet effet il contient également une sonnerie qui lorsqu'il n'y a pas transmission est intercalée dans la ligne. Des commutateurs permettent de mettre cette sonnerie hors du circuit et d'y introduire à volonté le transmetteur ou le récepteur.

Lorsqu'un bureau A veut expédier une dépêche au bureau B, l'employé de A met la sonnerie hors circuit et envoie un courant dans la ligne, courant qui met en action la sonnerie à l'autre extrémité, en B; en A on rétablit la sonnerie dans le circuit et B, à son tour, envoie un courant qui agissant sur la sonnerie de A prévient que l'appel a été entendu. Au bureau expéditeur A, on met alors le transmetteur dans le circuit et en B, on substitue le récepteur à la sonnerie; on peut alors effectuer la transmission. Quand celle-ci est terminée, on rétablit aux deux extrémités les sonneries dans le circuit jusqu'à ce qu'il y ait une autre transmission à effectuer.

Il peut arriver que le bureau A veuille communiquer non avec le bureau B, mais avec un autre bureau C qui est en relation avec B; dans ce cas, A après avoir appelé B, l'en prévient par des signaux particuliers; B se met à son tour en communication avec C, puis lorsqu'il a prévenu cette station, il met hors circuit ses divers appareils et établit une relation directe entre le fil qui le fait communiquer avec A et celui qui le fait communiquer avec C; la station A peut alors envoyer directement la dépêche à C. Il faut, d'autre part, que la station B soit avertie lorsque la transmission est terminée, ce dont on ne peut la prévenir directement puisque ses appareils sont tous hors circuit. Mais un galvanomètre est intercalé sur la ligne et la déviation de l'aiguille dure tant que le courant passe; lorsque l'aiguille est revenue à sa position d'équilibre et y reste, c'est que

la transmission est terminée; le bureau B rétablit alors les sonneries sur les lignes aboutissant à A et à C.

Un grand nombre d'autres combinaisons peuvent se présenter et pour chacune d'elles il conviendra de disposer les communications d'une manière spéciale de façon à satisfaire aux conditions imposées. Un des cas qui se présentent le plus fréquemment c'est celui où un bureau A communique séparément avec plusieurs bureaux B_1, B_2, B_3... qui ne sont pas sur la même ligne. Il faut évidemment dans ce cas une sonnerie spéciale sur chacune de ses lignes dans le bureau A, puis un manipulateur et un récepteur qui puissent à volonté et successivement être mis dans le circuit où une communication doit être établie.

Nous donnerons ultérieurement quelques indications relatives aux dispositions générales qui peuvent être adoptées.

540. — On est parvenu à établir des communications entre des pays séparés par des bras de mer, par des océans même, par l'emploi de câbles sous-marins immergés au fond de l'eau et qui renferment un ou plusieurs conducteurs entourés de matières isolantes. Non seulement ces lignes sous-marines présentent à étudier la disposition même du conducteur et de ses enveloppes protectrices, mais en outre les conditions de la transmission ne sont pas les mêmes que sur les fils aériens : le conducteur forme avec l'eau qui l'entoure, et dont il est séparé par une substance isolante, un véritable condensateur; aussi les charges et décharges de ce fil se produisent-elles dans des conditions spéciales qui exigent des appareils spéciaux aussi bien à la transmission qu'à la réception.

541. — Quel que soit le soin apporté à l'isolement des lignes, il n'est jamais absolu et il existe des pertes qui affaiblissent le courant, de telle sorte que si la distance est très grande, l'intensité peut être trop faible au bureau d'arrivée pour faire fonctionner le récepteur; on fait alors usage d'un relais, appareil pouvant entrer en action sous l'influence de très faibles courants et après lequel la ligne aboutit à la terre; une autre ligne présentant une pile spéciale est en relation avec le relais et aboutit à l'autre extrémité avec le récepteur de la station d'arrivée; la disposition est telle que le relais par ses mouvements établit dans cette nouvelle ligne des variations de courant synchrones de celles qui le fait mouvoir, il arrive donc au récepteur un courant présentant les mêmes arrêts et reprises que le courant primitif, mais ayant une intensité suffisante pour mettre le récepteur en action. Le relais, dans le cas de lignes très longues, peut être placé à moitié distance des points

extrêmes; si la ligne n'est pas trop longue, il est placé à la station d'arrivée et c'est une *pile locale* qui agit sur le récepteur.

Ajoutons encore que dans les temps orageux, des courants intenses peuvent se manifester dans les lignes et arrivant dans un bureau peuvent détériorer les appareils ou même blesser ou tuer les opérateurs; pour éviter ces accidents, on fait usage d'appareils spéciaux connus sous le nom de *paratonnerres*.

542. — Une des dépenses les plus considérables dans l'installation d'une ligne télégraphique, c'est l'établissement de la ligne elle-même, c'est-à-dire des fils conducteurs et des supports sur lesquels ils s'appuient. Aussi doit-on rechercher à utiliser ces fils le mieux, le plus possible, si l'on veut arriver à obtenir des transmissions télégraphiques à bon marché; c'est-à-dire qu'il faut chercher à faire passer dans un fil le plus grand nombre possible de dépêches dans un temps donné. D'une manière générale, deux moyens différents peuvent servir à augmenter la capacité télégraphique d'une ligne; cette capacité est limitée, exclusivement peut-on dire s'il ne s'agit que d'une ligne aérienne, par la lenteur relative des appareils de transmission. Le temps nécessaire à la production et à la réception d'un signal est plus grand que celui qui correspond à l'occupation de la ligne par le courant qui est émis à son occasion. Il était donc naturel de rechercher des appareils dans lesquels la manœuvre représentant l'envoi d'une lettre fût la plus rapide possible, il était naturel d'essayer des transmissions automatiques, ces transmissions étant nécessairement plus promptes que celles qui sont produites directement par la main de l'opérateur: de nombreuses recherches ont été faites dans cette voie et on est arrivé comme nous le dirons à d'importants résultats.

Mais, d'autre part, on a abordé le problème dans un autre ordre d'idées et l'on a cherché à faire servir un même fil à transmettre simultanément plusieurs dépêches; on y est arrivé, tantôt par une transmission réellement simultanée, c'est-à-dire par le passage *simultané* de plusieurs courants dans le fil, tantôt par une transmission dans laquelle les opérateurs agissent bien en même temps sans qu'il y ait en réalité *simultanéité* du passage des courants. Des résultats extrêmement remarquables ont été obtenus dans ce sens; nous aurons à signaler les plus intéressants.

Dans l'étude nécessairement résumée et incomplète que nous allons faire des télégraphes électriques, nous étudierons d'abord tous les éléments qui sont indépendants de la nature même du système employé, la ligne, la pile, les commutateurs, les paraton-

nerres; c'est seulement alors que nous entrerons dans quelques détails relatifs aux principaux appareils de transmission et de réception.

543. Des piles en télégraphie. — Il n'y a rien de particulier à dire sur les piles qui sont usitées en télégraphie; ce sont, au moins en général, des piles formées d'éléments Daniell ou Callaud, Marié-Davy ou Leclanché; les éléments sont réunis en série et leur nombre dépend naturellement de la longueur et de la résistance des conducteurs ainsi que du travail qui est demandé au courant dans la réception, c'est-à-dire de la nature des récepteurs qui sont construits pour fonctionner avec une intensité minima. Cette intensité est en général assez faible et ne dépasse pas en général, 20 milliampères; le courant n'est pas toujours employé du reste à effectuer le travail même fourni par le récepteur, mais seulement à régler le fonctionnement de pièces qui sont mises en mouvement par un moteur spécial qui est, suivant les circonstances, un rouage d'horlogerie à ressort ou à poids, un moteur à eau, un moteur électrique, etc.

Dans quelques circonstances exceptionnelles, il existe effectivement un *circuit* comprenant la pile, le manipulateur et le récepteur reliés deux à deux par des conducteurs, puis un fil dit *fil de retour*, qui relie le récepteur avec le pôle de la pile opposée à celui qui est en communication avec le manipulateur. Cette disposition est très rarement employée et en général, comme nous l'avons indiqué, la pile par un de ses pôles et la ligne à l'autre extrémité doivent être mises en relation avec la terre pour pouvoir être maintenues en ces points au potentiel zéro.

A cet effet on établit ces communications par des conducteurs ayant une faible résistance, par exemple par de larges câbles tressés en fils de fer ou de cuivre; ces conducteurs doivent se terminer dans une partie du sol qui soit et qui reste conductrice. On peut faire aboutir ces conducteurs à des conduites d'eau ou de gaz en les y reliant par une soudure.

544. Des lignes aériennes. — Les conditions d'établissement de la ligne sont nécessairement très différentes suivant qu'il s'agit de lignes aériennes ou de lignes sous-marines; nous nous occuperons d'abord des premières et nous terminerons par les lignes souterraines.

Les lignes aériennes présentent à considérer le conducteur et les supports sur lesquels il repose.

Le conducteur est un fil métallique cylindrique : il doit, d'une

part, être le moins résistant possible au passage du courant, tout en ayant le moindre poids pour ne pas surcharger les points d'appui; il doit, d'autre part, présenter une assez grande ténacité pour permettre d'espacer ces points d'appui sans qu'il y ait à craindre la rupture du fil sous son propre poids : la multiplicité des supports et l'augmentation de leur solidité élèvent le prix de l'installation. Enfin, il y a bien entendu aussi à tenir compte du prix du métal dont est formé le conducteur.

Le conducteur employé dans les lignes télégraphiques est presque universellement le fil de fer galvanisé, c'est-à-dire recouvert d'une mince couche de zinc qui le préserve de l'oxydation (pour les lignes téléphoniques aériennes, on a employé les fils de cuivre et les fils de bronze siliceux); le fil employé a un diamètre qui varie suivant l'importance des lignes de $0^m,006$ à $0^m,003$.

Un fil destiné à relier deux bureaux n'est jamais d'un seul morceau; il est formé de plusieurs parties que l'on raccorde. Pour opérer un raccord on place les extrémités bout à bout sur une certaine longueur en les serrant fortement l'une contre l'autre à l'aide d'un fil métallique plus fin, enroulé en hélice, puis on soude le tout. On peut également introduire ces deux extrémités dans un manchon métallique, évidé latéralement, et dans lequel on coule de la soudure.

545. — Les points d'appui sur lesquels repose le fil ou les fils qui unissent deux stations sont placés à des distances variables suivant le diamètre du fil et suivant d'autres circonstances, comme la forme de la route en plan, ces supports devant être plus rapprochés dans les parties courbes. Dans les alignements droits, cet écartement est environ de 80 mètres.

Ces supports doivent avoir une assez grande résistance : dans tous les cas ils ont à supporter le poids des divers fils qui s'y reposent et de plus les actions latérales provenant de l'action du vent; en outre, dans les parties courbes, ils ont à résister à la tension des fils qui tend à les renverser; la question est importante et doit être étudiée dans chaque cas.

Les supports employés sont généralement en France des poteaux en sapin ou en pin; leur hauteur varie de 6 à 12 mètres, ils sont enfoncés en terre de $1^m,50$ à $2^m,50$; dans certains cas ces poteaux sont *jumelés*, placés parallèlement à une petite distance et réunis par des traverses horizontales; dans les angles ou les courbes, alors que par la tension des fils il existe une force horizontale, on consolide le poteau qui sert de support par un autre placé oblique-

ment, de manière à s'opposer au renversement du premier. Dans les villes, on se sert le plus souvent de potelets fixés aux murs des maisons par des tiges de fer scellées dans la maçonnerie.

Dans quelques pays, on emploie comme support des poteaux en fer dont la forme et la disposition peuvent varier. Il n'y a, en principe, aucune différence entre ces deux systèmes, et c'est seulement la question de dépense qui décide du choix à faire; il faut tenir compte, bien entendu, non seulement de la dépense de premier établissement, mais encore de la durée des supports.

546. — Les fils sont suspendus sur les poteaux par des supports de matière isolante auxquels on donne le nom d'*isolateurs*. Nous ne saurions décrire toutes les formes d'isolateurs qui ont été proposées ou adoptées et nous devons nous borner à quelques considérations générales.

La porcelaine vernissée est presque exclusivement employée pour la construction des isolateurs, non que ce soit absolument la substance la moins conductrice, et, à cet égard, l'ébonite conviendrait mieux. Mais il faut tenir compte de l'influence des agents atmosphériques; sous l'influence de la pluie l'ébonite se recouvre d'une couche d'eau à peu près uniforme, tandis qu'il se produit plutôt des gouttes isolées sur la porcelaine qui conserve mieux son pouvoir isolant; il est vrai que par les temps de grande humidité ou de brouillard, l'ébonite se mouille moins. Mais, sous l'influence prolongée de l'air et des variations de température, la surface de l'ébonite devient rugueuse et se trouve, par là, plus propre à retenir la poussière, tandis que la porcelaine conserve toujours son poli. Or les poussières déposées sur les isolateurs sont une cause très puissante de déperdition et doivent surtout être évitées; c'est pour cette raison que l'on a renoncé aux abris que, au début de l'établissement des lignes télégraphiques, on avait essayé de placer sur les poteaux pour garantir les isolateurs de la pluie et assurer l'isolement en les maintenant secs. Outre que ces abris ne s'opposent pas à l'action du brouillard, ils empêchent la pluie de laver les isolateurs et de les débarrasser de la poussière.

Les isolateurs sont le plus souvent, en France au moins, fixés directement sur les poteaux; quelquefois, dans les cas de lignes très nombreuses, ils sont disposés sur des traverses horizontales portées par les poteaux : cette disposition est fréquemment employée dans certains pays étrangers.

L'isolateur à cloche (fig. 422) est un modèle d'un usage presque général en France : il se compose d'une cloche en porcelaine tour-

nant sa cavité vers le bas et portant au-dessus, sur un côté, deux oreilles dans lesquelles on a ménagé des ouvertures circulaires par où passent les vis qui fixent l'isolateur au poteau; au centre de la cavité on a mastiqué solidement, à l'aide de plâtre délayé avec de la colle forte, une tige de fer galvanisé recourbée en crochet à la partie inférieure; c'est sur ce crochet que pose le fil de ligne où il est fixé, en cas de besoin, à l'aide d'une ligature en fil fin. La forme de cloche a été choisie pour que, entre le fil de ligne et le poteau, il existe une partie qui reste absolument sèche, même en temps de pluie, et, d'une manière générale, l'isolement est d'autant plus parfait que la profondeur de la cloche est plus grande.

Dans certaines circonstances, le fil pose sur l'isolateur au lieu d'être soutenu en dessous; c'est le cas des isolateurs-arrêts, par

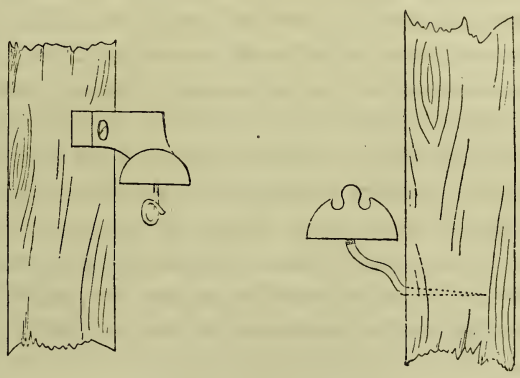


Fig. 422 et 423. — Isolateurs.

exemple, que l'on emploie lorsque l'on veut arrêter un fil de ligne à un poteau. Ils présentent d'une manière générale la forme d'une cloche surmontée de parties en saillie, mamelon central et champignons latéraux (fig. 423); une tige de fer est mastiquée dans la cloche et, après s'être recourbée, se termine par une partie plane et élargie qui s'appuie sur le poteau où elle est solidement serrée par des vis ou par une pointe qui pénètre dans le bois : lorsque les poteaux supportent des traverses, la tige est rectiligne et fixée sur la traverse à l'aide de boulons. Le fil est posé sur l'isolateur entre les saillies qui existent à la partie supérieure : il est fixé sur le mamelon central si le fil doit être arrêté.

547. — Les isolateurs ne peuvent pas être considérés comme s'opposant absolument au passage de l'électricité, surtout par les temps humides; ce sont seulement des conducteurs très résistants.

Un bon isolateur à cloche présente une résistance qui, même en temps très humide, dépasse 10 000 000 d'ohms; cette résistance varie d'ailleurs beaucoup suivant les conditions : ainsi sur une ligne télégraphique en Angleterre qui présentait quarante-quatre isolateurs (du système Varley) l'isolement total fut évalué à 290 000 ohms par une nuit très brumeuse (soit plus de 12 000 000 d'ohms par isolateur), il devint 2 000 000 d'ohms le lendemain au lever du soleil.

Quoique, par suite de la grandeur de ces résistances, les pertes par les supports soient faibles, il y a évidemment intérêt à les diminuer en diminuant le nombre des supports; mais il y a une limite à l'écartement, à cause de la flèche que prend le fil et qui augmente rapidement avec cet écartement.

Sans vouloir entrer dans le détail des essais qu'il convient de faire pour étudier une ligne, il est facile de concevoir comment on peut avoir une idée de la valeur de l'isolement. Étant données les deux stations A et B que réunit le fil, la station B isole le fil tandis que, en A, le fil est relié à un galvanomètre et à un pôle de la pile dont l'autre pôle est à la terre. Si l'isolement était absolu, après une période très courte qui correspondrait à l'état variable (108), il n'y aurait aucun courant signalé par le galvanomètre ; en réalité l'aiguille de celui-ci est toujours déviée, il y a donc un courant. Si le galvanomètre est gradué et donne la valeur du courant, et si l'on connaît la force électro-motrice de la pile, on pourra calculer la résistance de la ligne, c'est-à-dire dans ce cas en réalité la résistance des supports.

548. Des lignes souterraines. — Dans certains cas on dispose les conducteurs souterrainement dans des conduites en métal, en poterie ou en ciment; le fil métallique doit alors être recouvert dans toute sa longueur d'une substance isolante. Comme le conducteur n'a à résister à aucune tension, puisqu'il repose sur toute sa longueur, on emploie des conducteurs en cuivre; le fil de cuivre est alors entouré de gutta-percha et, pour éviter que celle-ci ne se fendille par suite des modifications qu'elle subit par oxydation, on recouvre cette enveloppe isolante d'une couche protectrice, d'un ruban de coton imbibé de goudron de bois; c'est ce que l'on nomme le *guipage*. Le plus souvent on réunit plusieurs conducteurs ainsi disposés pour former un câble qu'on recouvre d'un nouveau guipage, et même de deux le plus souvent.

Les conduites dans lesquelles on place un nombre variable de câbles suivant l'importance de la ligne présentent des *regards* de distance en distance : ces regards permettent de faire aisément des

essais sur la ligne en des points intermédiaires aux stations; ils permettent aisément aussi de remplacer sur une étendue limitée un ou plusieurs conducteurs. A chacun de ces regards, les conducteurs doivent être numérotés de manière à ce que les essais sur un fil déterminé se fassent sans tâtonnement.

Si la conduite est formée de tuyaux en fonte ou en poterie, le fil est introduit à une extrémité et on le fait pénétrer par traction; la traction ne porte pas, bien entendu, sur toute la longueur, mais seulement sur l'étendue comprise entre deux regards. Dans le cas de conduite en ciment, on a proposé de constituer les tuyaux de deux parties; on pose le demi-cylindre inférieur qui forme une rigole dans laquelle on place les câbles sans avoir recours à la traction, puis, lorsque cette opération est terminée, on complète la conduite en adaptant le demi-cylindre supérieur.

Dans les villes, les câbles sont placés directement dans les égouts sans être réunis dans des conduites générales; mais pour éviter les effets fâcheux des gaz et des vapeurs qui existent dans cette atmosphère confinée, on place chaque câble dans un tuyau de plomb; ces câbles, qui présentent une certaine rigidité, sont fixés aux parois par des supports métalliques de forme variable.

On a proposé divers systèmes pour assurer l'isolement des fils conducteurs destinés aux lignes souterraines, par exemple en noyant les fils métalliques dans une masse continue de bitume ou d'un mélange bitumineux, en ayant soin de maintenir les fils à des distances invariables jusqu'à dessication complète du mélange : ce procédé ne paraît pas avoir donné de bons résultats jusqu'à présent.

M. Hermann-Lachapelle a proposé de passer les fils dans des perles de matière isolante, de bois sec, de manière que ces perles soient en contact ou à peu près; les conducteurs peuvent alors être posés à côté les uns des autres sans précaution particulière, et il n'y a pas à craindre qu'il puisse s'établir de contact entre ces conducteurs.

549. Des lignes sous-marines. — Les transmissions télégraphiques à travers une étendue considérable occupée par l'eau, fleuve, lac ou mer, se font à l'aide de câbles immergés et reposant sur le fond; la construction de ces câbles est toujours la même en principe et les différences portent sur certains détails et sur les dimensions. Un câble comprend une partie centrale formée d'un conducteur recouvert d'une matière isolante, le tout entouré de parties protectrices servant à augmenter la solidité et à s'opposer à l'usure.

Les conditions sont très complexes s'il s'agit de câbles destinés

à la traversée de mers profondes; il faut tenir compte d'une part de l'action que peut subir la matière isolante sous l'influence de l'eau soumise à des pressions énormes, pressions qui dépassent 500 atmosphères sur les lignes transatlantiques; de plus, pendant l'immersion à ces grandes profondeurs, tendu entre la partie qui repose déjà sur le fond et le navire d'où il se déroule, le câble est soumis à de très fortes tensions auxquelles il doit pouvoir résister. Enfin lorsqu'il est posé, ces tensions ne cessent pas toujours, car, si dans certaines parties il repose réellement sur le fond, il en est d'autres où, malgré les soins apportés à la pose, il reste suspendu au-dessus des vallées sous-marines, s'appuyant seulement sur le sommet des montagnes. Le câble doit avoir par conséquent une grande solidité; pour satisfaire à ces diverses conditions, voici les dispositions généralement adoptées.

Le conducteur est formé exceptionnellement d'un fil de cuivre

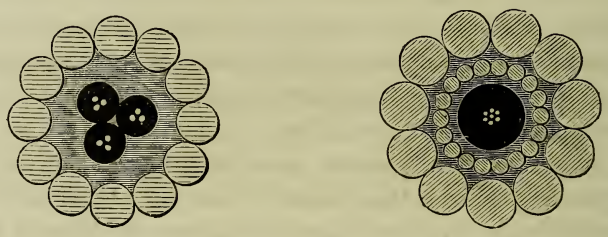


Fig. 424 et 425. — Câbles sous-marins.

unique; mais le plus souvent, il est composé par une cordelette de fils de cuivre au nombre de trois à sept (fig. 424 à 426); si l'un des fils vient à casser sous une cause quelconque, le courant n'est pas interrompu. Ce conducteur est entouré d'une enveloppe isolante formée de couches concentriques alternatives de gutta-percha et de composition Chatterton (composition qui est un mélange de gutta-percha et de goudron de bois dit goudron de Stockholm) : on obtient à la fois un isolement parfait et une grande résistance à la pression de l'eau. L'ensemble de ces deux parties qui, au point de vue électrique, sont seules intéressantes, forme ce que l'on appelle l'âme du câble; autour de l'âme on dispose les parties protectrices qui varient suivant les circonstances, et constituent ce que l'on désigne sous le nom d'*armature*. On entoure l'âme d'étoupe, de chanvre imprégné de sulfate de cuivre pour s'opposer aux altérations, et on dispose une couche extérieure formée de fils de fer recouverts de chanvre goudronné et enroulés en hélice (fig. 424); c'est cette dernière partie

qui résiste à la tension et à l'usure; aussi augmente-t-on son épaisseur dans les voisinages des côtes, lorsqu'il peut y avoir frottement contre les rochers ou contre les ancres (fig. 425 et 426).

Les conditions du passage de l'électricité dans les câbles sous-marins sont tout autres que dans les fils aériens; la complexité résulte de ce que le conducteur forme avec l'eau qui entoure le câble un véritable condensateur dont la capacité est notable. Aussi faut-il des conditions spéciales pour la transmission des dépêches par les fils sous-marins; nous traiterons la question à part, après celle des transmissions télégraphiques par les fils aériens.

550. Des commutateurs. — Les commutateurs sont destinés à

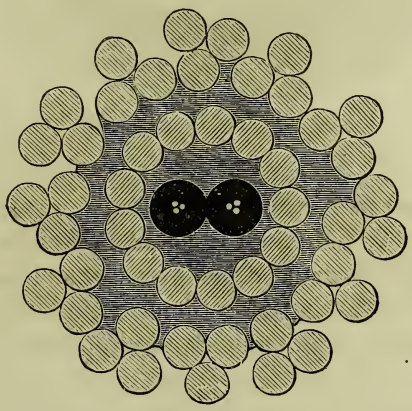


Fig. 426. Câble sous-marin.

établir ou à interrompre à volonté la communication entre deux parties d'un même conducteur ou entre deux conducteurs différents qui doivent être parcourus par un courant; les commutateurs employés en télégraphie diffèrent de ceux dont on se sert dans les laboratoires en ce qu'ils n'ont pas, en général, comme ces derniers à changer le sens du courant. Mais, d'autre part, il faut pouvoir relier entre eux de toutes les manières possibles des séries de conducteurs dont le nombre peut être considérable.

Nous signalerons les modèles les plus usités.

Lorsque l'on doit pouvoir relier successivement un même conducteur à plusieurs lignes différentes, on peut employer le commutateur rond (fig. 427); cet appareil est constitué par un disque en matière isolante portant au centre un axe métallique qui est en communication métallique avec le conducteur D; sur cet axe est

montée une lame en laiton faisant ressort *l* et qui se termine d'autre part par une manivelle en bois P. Dans sa rotation, le ressort peut venir rencontrer successivement divers pièces de laiton formant contact et auxquelles aboutissent les différentes lignes; en mettant le

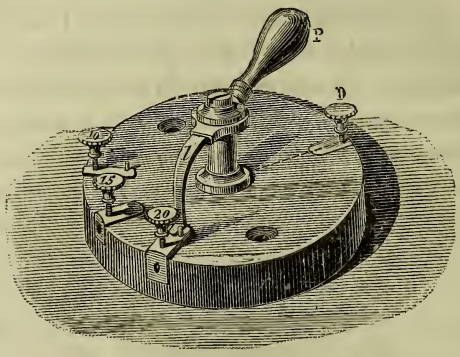


Fig. 427. — Commutateur rond.

contact sur l'une ou l'autre de ces pièces, on pourra donc faire communiquer D à volonté avec l'une ou l'autre de ces lignes. Si on tourne la manivelle de manière que le ressort ne touche aucune pièce métallique, toutes les communications sont interrompues.

On peut employer des modèles se rapportant plus ou moins

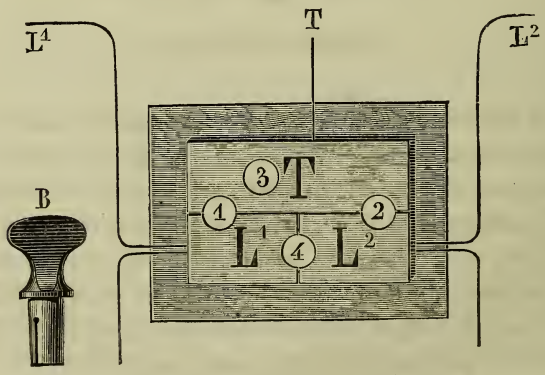


Fig. 428. — Commutateur bavarois.

directement au système dit bavarois (fig. 428). Sur une plaque isolante en bois ou en ébonite, on fixe des plaques métalliques T, L^1, L^2 laissant entre elles de minces intervalles à bords parallèles; l'une de ces pièces par exemple est allongée et est mise en relation avec

le conducteur T; les autres communiquent respectivement avec les lignes L^1, L^2, elles sont placées en face d'un des longs côtés de la pièce rectangulaire précédente. Ces diverses pièces sont entaillées légèrement en regard et dans les échancrures ainsi obtenues on peut introduire une fiche métallique B dont la tête est en ébonite; l'introduction de cette pièce établit la communication entre les fils qui aboutissent aux plaques qu'elles touchent.

On peut généraliser cette disposition et, à l'aide de pièces de formes variées et en nombre convenable, arriver à établir et à changer aisément les communications entre diverses lignes ainsi qu'il est aisé de le concevoir.

551. — La question se complique lorsque l'on a un certain

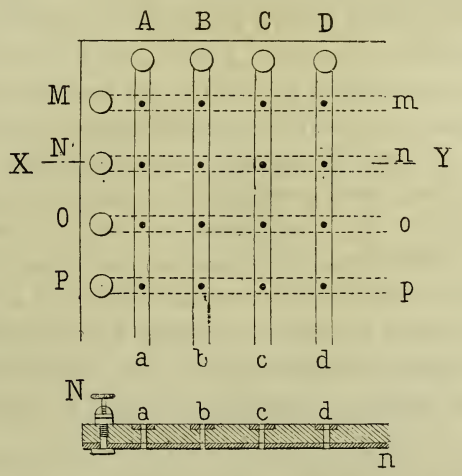


Fig. 429. — Commutateur suisse. Plan et coupe suivant X Y.

nombre de lignes dans une direction pouvant communiquer de toutes les façons possibles avec des lignes également nombreuses d'une autre direction. On peut alors faire usage du commutateur suisse qui est disposé ainsi qu'il suit (fig. 429) : chacune des lignes de la première direction A, B, C, D..., aboutit à une lame fixée à l'extrémité d'une bande métallique; ces diverses bandes *a*, *b*, *c*, *d*..., sont placées parallèlement sur une pièce en bois. De même, les lignes de l'autre direction M, N, O, P... sont reliées à des lames métalliques *m*, *n*, *o*, *p*..., fixées parallèlement sous cette pièce de bois de manière à ce que les lames métalliques d'une série soient perpendiculaires aux lames métalliques de l'autre. Enfin des trous verticaux sont pratiqués dans toute l'épaisseur aux points où se

croisent les bandes métalliques des deux systèmes. Lorsque l'on enfoncera dans l'un de ces trous une fiche métallique assez longue, on mettra en relation les deux bandes correspondantes et par suite les lignes qui aboutissent à ces bandes. On voit aisément que, avec ce système, on peut établir toutes les communications de chacune des lignes de la première direction avec chacune des lignes de l'autre série ; on reconnaît également que l'on peut établir simultanément autant de communication que l'on veut en employant un nombre égal de fiches.

Enfin lorsque le nombre des lignes est très considérable et qu'il doit être nécessaire de pouvoir établir de fréquentes et multiples communications simultanées, on peut faire arriver les divers fils à des pièces métalliques isolées et présentant par exemple une ouverture légèrement conique ; on a d'autre part des câbles souples formés d'une âme métallique recouverte d'une enveloppe isolante de soie ou de coton et terminés à leurs extrémités par des fiches pouvant entrer à frottement dans les ouvertures précédemment indiquées. A l'aide de ces câbles on peut établir les communications de toutes les manières possibles : mais pour que le système soit pratique il convient que les pièces où s'établissent les contacts soient disposées d'une manière méthodique ; elles peuvent par exemple être disposées en quinconce, de manière que chacune d'elles soit nettement déterminée par le numéro d'ordre de la rangée à laquelle elle appartient pour deux directions rectangulaires et que, inversement, on puisse rapidement la trouver, lorsqu'on connaît les numéros qui la caractérisent.

On peut autrement disposer ces contacts sur des circonférences concentriques et former alors ce que l'on appelle des rosaces qui sont en usage dans les bureaux centraux des télégraphes et des téléphones.

Le fonctionnement de ces divers commutateurs est simple et facile à comprendre : il est donc inutile d'insister davantage.

552. Des relais. — Comme nous l'avons indiqué d'une manière générale, lorsque la ligne est très longue le courant arrive trop affaibli au récepteur pour pouvoir faire fonctionner celui-ci ; il faut alors faire usage à la station d'arrivée d'un relais qui, très sensible, fonctionne sous l'influence du courant de la ligne et établit ou interrompt les communications dans un circuit comprenant seulement une pile locale et le récepteur. Le récepteur devant recevoir des courants qui, à l'intensité près, présentent les mêmes variations que s'il recevait le courant direct, le relais devra mar-

cher comme le ferait un manipulateur qui fonctionnerait synchroniquement avec celui du poste qui expédie la dépêche.

Quand la distance est très grande, il faut placer le relais non à la station extrême où le courant serait trop affaibli, mais à une station intermédiaire où se trouve une pile qui envoie le courant dans la seconde section du fil de ligne ; l'action est la même, seulement le circuit local s'est étendu et a pris une importance égale à celle de la première partie de la ligne : le relais a reçu dans ce cas plus spécialement le nom de *translateur*. Il diffère du relais proprement dit en ce que tandis que celui-ci reçoit le courant toujours dans la même direction, le translateur doit pouvoir fonctionner quelle que soit la direction, quelle que soit la station expéditrice ; il doit donc présenter des dispositions spéciales qui le rendent plus complexe que le relais simple. Il convient d'ajouter que, par contre, un seul

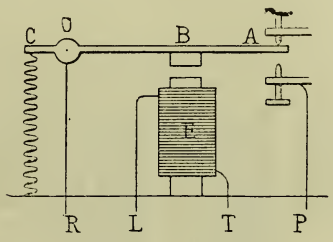


Fig. 430. — Relais.

translateur suffit à assurer le service d'une ligne, tandis qu'il faut deux relais, un à chacune des stations extrêmes.

Le type le plus simple du relais consiste en un électro-aimant E (fig. 430) dont le fil communique d'une part avec la ligne et d'autre part avec la terre par les bornes L et T. Au-dessus se trouve un levier léger AC, mobile autour de l'axe O, et dont l'extrémité A oscille entre deux butoirs munis de vis pour le réglage ; un ressort fixé à l'autre extrémité C et convenablement tendu a pour effet d'appliquer l'extrémité A contre le butoir supérieur. Le butoir inférieur est relié à l'un des pôles de la pile locale dont l'autre pôle est à la terre ; enfin l'axe O qui est métallique est relié au récepteur R qui, d'autre part, est en relation avec la terre.

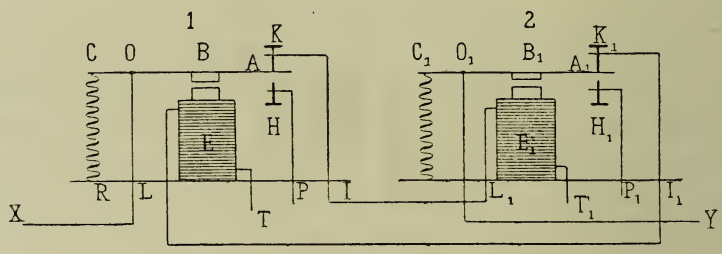
Le fonctionnement de ce relais est aisé à comprendre : lorsque le courant de la ligne passe, le levier AO est attiré par l'électro-aimant, l'extrémité A vient toucher le butoir inférieur et dès lors par l'intermédiaire de ce butoir et du levier AO, le courant de la pile locale

est transmis au récepteur R. Aussitôt que le courant de la ligne cesse, l'électro-aimant n'agissant plus, le ressort soulève le levier et le circuit du courant local est rompu. Il y a donc synchronisme entre les courants de la ligne et les courants du circuit local; le récepteur fonctionnera donc comme s'il recevait directement ceux-ci et que leur intensité fût suffisante.

En réalité, l'électro-aimant présente ordinairement deux bobines; le levier AC passe entre les deux et porte en B une palette de fer doux perpendiculaire à sa direction et qui s'étend jusqu'au dessus des pôles.

553. — Le relais simple que nous venons de décrire peut servir de translateur par un groupement convenable de deux appareils : aux communications précédemment signalées, il faut alors en joindre une qui aboutit au butoir K.

Les communications sont établies comme l'indique la figure 431 :



Fig, 431. — Relais employés comme translateur.

au repos, les deux leviers butent contre les vis K et K_1. Supposons que la station X veuille transmettre une dépêche; les courants qu'elle enverra suivent le chemin suivant $ALOKIL_1T_1$, et provoqueront des mouvements du levier A_1C_1; par suite de l'abaissement du levier, le courant partant de la pile locale P_1 passera en H_1O_1, et de là à la ligne qui aboutit à la station Y. On voit que le relais 2 fonctionnera dans ce cas comme s'il était seul; le relais 1 n'agit point et la pile locale correspondante P ne fonctionne pas, le courant traversant seulement le levier AC et le butoir K qui ne se séparent point.

Si on voulait expédier une dépêche de Y vers X, le relais 2 servirait seulement de conducteur et le relais 1 fonctionnerait seul comme relais.

554. — On fait usage de relais à armatures polarisées qui ne présentent pas de ressort antagoniste et qui, suivant le mode d'em-

ploi, peuvent donner des résultats différents. Nous décrirons comme type le relais Siemens (fig. 432).

Il se compose d'un aimant permanent doublement recourbé : l'une des branches polaires S qui correspond au pôle sud, par exemple, sert de support à son extrémité à un axe O autour duquel peut tourner une lamelle de fer doux OA placée horizontalement, lamelle qui, par contact, s'aimante et devient un pôle sud. L'autre branche polaire est formée de deux cylindres d'acier placés parallèlement et qui sont les noyaux de deux bobines B′ B″ ; ces cylindres sont terminés à leur partie supérieure par deux pièces polaires *h′ h″* qui peuvent se déplacer légèrement pour le réglage ; la lame de fer doux OA passe entre ces deux pièces polaires qui l'attirent l'une et l'autre, puisque leurs polarités sont inverses de la sienne. Cette lamelle se

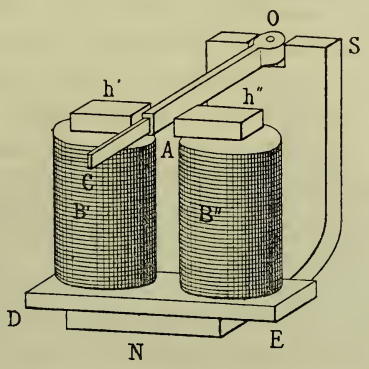


Fig 432. — Relais polarisé Siemens.

termine par une pièce en laiton AC qui oscille entre deux vis de butée qui servent à établir les communications électriques. Enfin ajoutons que l'enroulement du fil sur les bobines est tel que l'action d'un courant serait, comme d'ordinaire de faire naître deux pôles contraires aux extrémités des noyaux si ceux-ci n'étaient pas aimantés, mais comme ils possèdent déjà une aimantation, le courant augmentera la polarité de l'un des noyaux et diminuera celle de l'autre ; l'effet serait d'ailleurs absolument inverse si on faisait passer le courant en sens contraire. Quand le courant ne passe pas, il existe une position de la lame de fer doux pour laquelle celle-ci est en équilibre sous l'action des deux forces attractives émanées des deux pôles ; mais c'est là un équilibre instable, car le moindre déplacement de la lame augmentera la force attractive du pôle dont elle se rapproche et diminuera celle de l'autre de telle sorte que la

lame se précipitera sur le pôle le plus voisin et y restera. Elle se fixerait aussi bien, d'ailleurs, sur l'autre pièce polaire si le déplacement qu'elle a subi l'avait rapprochée de celle-ci.

On conçoit que si l'on fait passer dans les bobines un courant de sens tel qu'il renforce l'aimantation de la pièce contre laquelle est appuyée la lame et diminue en même temps l'aimantation de l'autre, rien ne sera changé dans le sens de l'action résultante et la lame de fer doux ne se déplacera pas. Il n'en sera pas de même si le courant passe en sens inverse; car les aimantations varieront en sens contraire : on peut avoir choisi les distances telles, que par suite de ce changement, l'action de la pièce la plus éloignée soit la plus énergique de telle sorte que la lame de fer doux se précipite sur elle, abandonnant la position qu'elle occupait; par suite de cette oscillation le contact aura été changé aux vis de butée. La lame restera à cette nouvelle position, soit qu'il ne passe pas de courant, soit que les courants qui agissent aient le même sens que celui qui a provoqué son déplacement; elle exécutera au contraire une oscillation en sens inverse de la précédente, lorsque le courant qui traverse les bobines aura changé de direction.

Ce relais est, bien entendu, destiné à fonctionner sous l'influence de courants alternés; mais, comme nous le dirons, il y a des manipulateurs qui agissent précisément ainsi.

555. — On peut construire des relais qui ne fonctionnent que lorsque le courant a un sens déterminé. Un relais de ce genre comprend un électro-aimant ordinaire et une palette aimantée : celle-ci peut être constituée par un aimant, ou elle peut être aimantée par son contact à une extrémité avec le pôle d'un aimant permanent. La palette peut se mouvoir entre une vis de butée contre laquelle un ressort la presse et l'extrémité du fer doux de l'électro-aimant. L'attraction de celui-ci ne se produira que lorsque le courant passant dans la bobine aura le sens qui communique au fer doux une aimantation contraire à celle de la palette qui abandonnera alors la vis de butée contre laquelle elle s'appuiera de nouveau quand le courant cessera; rien ne se produira si le courant marche en sens contraire.

Si l'on réunit deux relais semblables mais dans lesquels les fils sont enroulés sur les bobines en sens contraire, on aura un système qui fonctionnera toujours par l'un de ses éléments, quel que soit le sens du courant; ce système pourra donc être utilisé comme translateur et servira, quelle que soit celle des deux stations extrêmes qui expédie la dépêche.

556. Des paratonnerres. — Les appareils télégraphiques doivent êtres reliés à des paratonnerres qui sont destinés à éviter que ces appareils ne soient détériorés et que les opérateurs ne soient atteints par les courants forts qui peuvent circuler dans les lignes sous l'influence des variations notables de l'électricité atmosphérique.

Bien que les paratonnerres employés soient très variés dans leurs formes, ils se réduisent en réalité à un petit nombre de types différents, les uns basés sur les grandes différences de potentiel qui résultent de ces variations atmosphériques, les autres sur l'action calorifique dégagée par les courants intenses.

Les paratonnerres à pointes appartiennent au premier type : la ligne est en rapport avec une plaque métallique garnie de pointes (fig. 433); en face de cette plaque se trouve une autre lame métal-

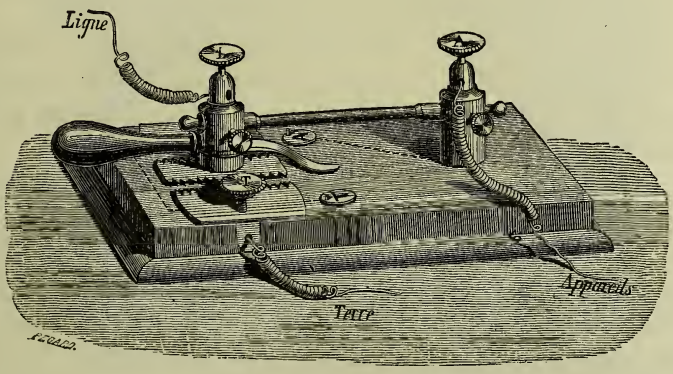


Fig. 433. — Paratonnerre télégraphique. (*Bréguet.*)

lique T située à très petite distance et communiquant avec la terre, cette lame métallique étant quelquefois plane et plus souvent armée de pointes placées en regard de celles qui se trouvent sur le conducteur relié à la ligne. Malgré la très petite distance et la forme aiguë des pointes, l'électricité ne s'écoule pas à la terre lors du passage des courants télégraphiques; mais lorsque la ligne est traversée par des courants intenses comme ceux qui prennent naissance par l'action des orages, les variations de potentiel qui se manifestent sont suffisantes pour produire l'écoulement à la terre malgré la présence de la couche d'air.

Dans une autre disposition on emploie deux plaques métalliques sans pointes communiquant l'une à la ligne et l'autre à la terre et séparées par une lame isolante mince, feuille de papier, mica ou

couche mince de gutta-percha. La résistance de cette lame est suffisante pour empêcher les courants ordinaires de la traverser, mais elle permet les décharges des courants de haute tension; chaque décharge produit dans la lame de petits trous très fins, ce qui ne l'empêche pas de servir plusieurs fois; en tout cas, la feuille isolante est très facile à remplacer.

Dans les paratonnerres à fil, la communication entre le récepteur se fait à l'arrivée au bureau par l'intermédiaire d'un fil fin; ce fil recouvert de soie repose sur une pièce métallique en communication avec la terre. Les courants télégraphiques passent dans le fil fin sans produire aucun effet particulier; mais les courants dus aux orages produisent un courant intense, le fil s'échauffe, la soie brûle et le fil fin se trouve mis en communication avec la pièce métallique sur lequel il repose et par là avec la terre, la ligne se décharge donc sans que le courant passe dans les appareils.

Les deux systèmes se trouvent souvent réunis comme l'indique la figure 433; de plus, il y a un commutateur qui permet de mettre directement la ligne à la terre dans les cas où des accidents paraissent être à craindre.

557. Systèmes divers de télégraphie électrique. — Les systèmes de transmission télégraphique présentent des variétés très nombreuses que l'on peut classer diversement suivant le point de vue où l'on se place.

Si l'on considère les résultats obtenus, il convient d'établir une division suivant que les signaux fournis par le récepteur sont fugitifs ou qu'ils laissent une trace matérielle. A un autre point de vue, les signaux peuvent être conventionnels, ils peuvent représenter des caractères usuels, lettres ou chiffres, ou même ils peuvent reproduire presque identiquement un écrit, un dessin qui a été fourni au transmetteur : ces différences donnent lieu à un autre mode de classification des systèmes. Autrement encore, il convient d'établir une distinction suivant que le signal est produit par une action mécanique (ce qui est presque toujours le cas actuellement) ou par une action chimique.

Ces divers modes de classification ne s'excluent pas d'ailleurs et ils peuvent être adoptés concurremment : mais ils sont artificiels, en quelque sorte, et il semble qu'une classification plus rationnelle soit la suivante :

1° Systèmes basés sur le nombre des émissions de courant;

2° Systèmes basés sur la durée des émissions ou sur la durée de l'intervalle qui sépare les émissions;

3° Systèmes dans lesquels on utilise, pour la différenciation des signaux, le nombre et la durée des émissions ;

4° Systèmes dans lesquels on fait intervenir les changements de sens du courant.

557. Télégraphe a cadran. — Le télégraphe à cadran de Bréguet appartient au genre des systèmes de transmission dans lesquels le nombre des émissions de courant est seul utilisé pour caractériser un signal. Nous décrirons successivement le manipulateur et le récepteur en laissant de côté les détails relatifs à l'établissement des

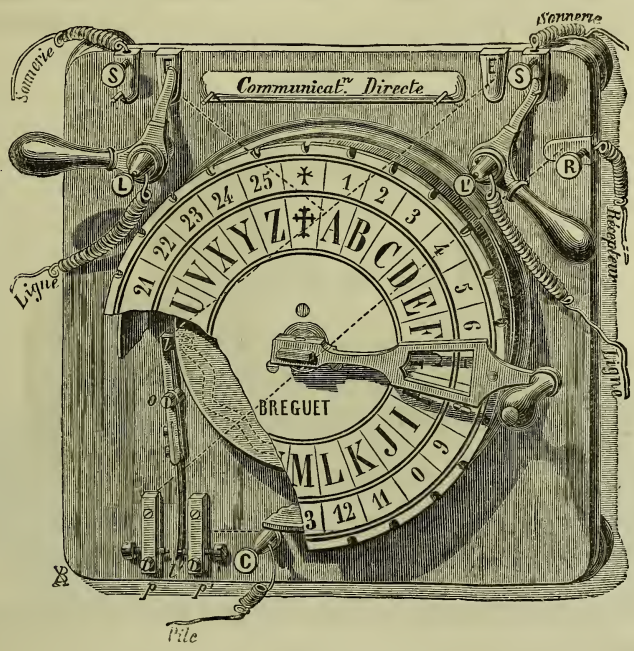


Fig. 434. — Télégraphe à cadran ; manipulateur. (*Bréguet.*)

communications ou à leur rupture, et nous arrêtant seulement aux organes qui sont utilisés pour la production des signaux.

Le manipulateur (fig. 434) se compose essentiellement d'un disque métallique plein placé horizontalement et pouvant tourner autour d'un axe vertical qui passe par son centre : le mouvement lui est communiqué par une manette qui se déplace au-dessus d'un cadran fixe placé parallèlement au disque et à la circonférence duquel on a établi 26 cases. La première qui est placée en haut du cadran porte une +, sur les autres sont tracées les lettres de l'alphabet ; en outre chaque case comprend un chiffre ou un signe de ponctuation.

Le disque métallique porte sur sa face inférieure une rainure sinueuse présentant 13 saillies et 13 creux; dans cette rainure s'engage un goujon métallique *l* qui est fixé à l'extrémité d'un levier mobile autour de l'axe vertical *o* et qui se prolonge au delà de cet axe. Lorsqu'on l'on fera tourner la manette, le disque sera entraîné et le levier exécutera des oscillations de part et d'autre de sa position moyenne; pour un tour complet de la manivelle, le levier exécutera donc 13 mouvements dans un sens et 13 mouvements dans le sens opposé.

L'extrémité libre du ressort *i* qui est constitué par une lame élastique se déplace entre deux vis de butée *p p'* qu'elle touche alternative-

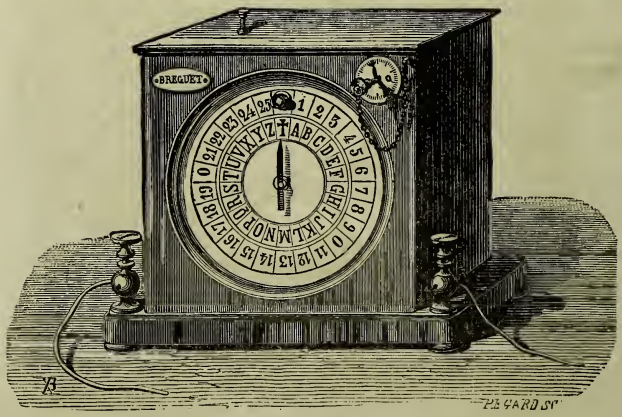


Fig. 435. — Télégraphe à cadran; récepteur.

ment à chaque oscillation, soit, pour un tour de la manivelle, treize fois chaque vis.

De ces deux vis, l'une *p* communique au récepteur de la même station, l'autre *p'* à la pile : l'axe du disque métallique est en communication avec la ligne. Enfin la manivelle est calée sur son axe de telle façon que lorsqu'elle est arrêtée en face de la +, la lame du levier touche la vis *p* : c'est la position de repos. Dans cette position, si un autre bureau envoie une dépêche, le courant traverse simplement le manipulateur et va dans le récepteur qu'il fait fonctionner (ou plutôt dans la sonnerie qui est jointe au récepteur). Si l'on veut transmettre une dépêche on met le récepteur hors du circuit et l'on fait tourner la manivelle; par suite de ce mouvement le levier oscille : lorsque la manette passe au-dessus de la 1re division, soit au-dessus de la lettre A, le levier vient toucher la pointe *p'*, le

courant passe; il cesse de passer lorsque la rotation continuant la manette est au-dessus de B, il est rétabli lorsque la manette est au-dessus de C, et ainsi de suite alternativement. En somme le passage de la manette au-dessus d'une lettre corrrespond à un nombre déterminé d'établissements ou d'interruptions de courants comptés à partir de l'instant où la manette était sur la +.

558. — Le récepteur (fig. 435 et 436) comprend essentiellement un électro-aimant horizontal EE qui est relié à la ligne d'une part, à la terre d'autre part, et devant les pôles duquel peut se mouvoir une palette de fer doux A mobile autour d'un axe horizontal et suscep-

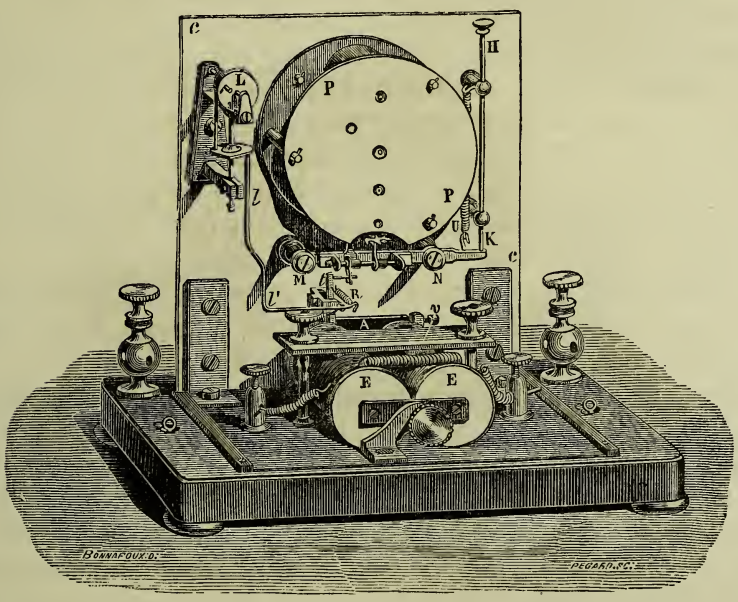


Fig. 436. — Télégraphe à cadran; récepteur.

tible d'osciller entre deux positions extrêmes déterminées par des vis de butée. A cette palette est fixée invariablement une tige rigide *t* qui s'élève au-dessus et qui est soumise à l'action d'un ressort à boudin R convenablement tendu, qui tend à écarter la palette de l'électro-aimant; mais lorsque celui-ci est traversé par le courant de la ligne, il attire la palette qu'il déplace en surmontant la résistance opposée par le ressort qui, de nouveau, éloigne la palette lorsque le courant cesse de passer.

D'autre part le récepteur comprend un rouage d'horlogerie P qui, lorsque le ressort est bandé, tend à faire tourner un axe horizontal.

Sur cet axe sont montées, à une extrémité, une aiguille qui se meut devant un cadran divisé en 26 cases portant les mêmes indications que le cadran du manipulateur; et, à l'autre extrémité, deux roues à rochet présentant 13 dents chacune; ces deux roues sont placées parallèlement à peu de distance et calées sur l'axe de telle sorte que les dents de l'une soient en face des vides de l'autre.

Le mouvement de tout ce système est arrêté par l'action d'une palette pouvant tourner autour d'un axe horizontal et qui est reliée au levier oscillant *t* par l'intermédiaire d'une fourchette, de telle sorte qu'elle se déplace, en même temps que celui-ci, de part et d'autre de sa position moyenne; cette palette est placée de telle façon qu'à chacune de ses positions extrêmes elle soit en prise avec l'une des roues à rochet seulement, par suite, lorsqu'elle passera d'une position extrême à l'autre, elle dégagera l'une des roues, ce qui permettra à la rotation de se produire, mais elle s'engagera en face de l'autre roue qu'elle arrêtera au moment où une dent viendra la rencontrer, c'est-à-dire après un vingt-sixième de tour; pendant ce mouvement l'aiguille aura donc passé d'une case du cadran à la suivante.

De cette façon le mouvement de l'aiguille est relié à celui du fer doux qui se meut devant l'électro-aimant, avançant d'une case chaque fois que ce fer doux exécute une oscillation.

559. — On peut comprendre maintenant comment se fait la transmission d'une dépêche; au repos, la manette du manipulateur et l'aiguille du récepteur sont l'une et l'autre sur la +. Lorsque l'on fait tourner la manette du manipulateur, on provoque alternativement des émissions et des interruptions de courant, et par suite, dans le récepteur, l'aiguille tourne, et sa rotation, liée au nombre des émissions et des interruptions, est à chaque instant la même que celle du manipulateur, à chaque instant la manette et l'aiguille sont sur les mêmes lettres de leur cadran respectif.

Lorsque l'on veut transmettre un mot, on fait mouvoir la manette uniformément jusqu'à ce qu'elle soit au-dessus de la première lettre du mot et l'on s'arrête un instant à cette position; puis on continue la rotation pour s'arrêter de même au-dessus de la deuxième lettre et ainsi de suite jusqu'à la fin du mot. Pendant ce temps l'aiguille du récepteur aura tourné, s'arrêtant en même temps que la manette au-dessus de la même lettre; si donc on regarde le cadran on pourra noter l'une après l'autre les lettres ainsi signalées et reconstituer le mot qui aura été transmis. Si l'on veut transmettre une phrase on opère de même seulement après chaque mot, on ramène

la manette à la + avant d'expédier la première lettre du mot suivant.

Cet appareil présente le grand avantage de pouvoir être utilisé, plus ou moins rapidement, par toute personne sachant lire qui peut expédier ou recevoir une dépêche même sans apprentissage; il présente, comme tous les systèmes qui ne laissent pas de traces matérielles, l'inconvénient de rendre faciles les erreurs de la réception et de ne pas permettre de contrôle.

La tension du ressort doit être proportionnée à l'intensité du courant qui traverse la ligne et l'électro-aimant, aussi l'appareil a besoin d'un réglage.

Il arrive quelquefois que les mouvements sur les cadrans ne sont plus concordants, l'aiguille étant en avance ou en retard d'une ou plusieurs lettres sur la manette, ce qui rend incompréhensibles

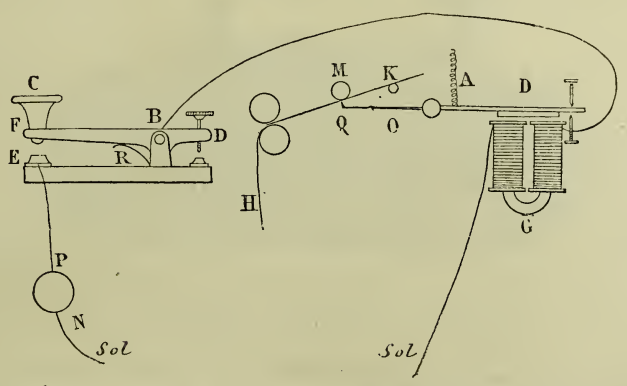


Fig. 437. — Principe du télégraphe Morse.

les dépêches reçues. On a adopté une disposition qui permet de rétablir aisément la concordance des mouvements; c'est ce qu'on nomme la remise à la +. Voici en quoi elle consiste : lorsque l'on s'est aperçu de cette irrégularité, on amène la manette du manipulateur au-dessus de la +. Au récepteur on appuie sur une tige MN qui déplace légèrement l'axe H qui porte la palette d'échappement, les roues à rochet peuvent alors tourner librement entraînant l'aiguille, mais ce mouvement est arrêté lorsque l'aiguille est en face de la +, parce qu'à ce moment une cheville fixée à l'une des roues et en saillie sur son plan vient buter contre un arrêt relié à l'axe de la palette d'échappement et abaissé avec elle. On abandonne alors la tige; un ressort U ramène à sa position normale cet axe, la palette d'échappement est de nouveau en prise avec les

rochets, le butoir relevé ne s'oppose plus à la rotation qui aura lieu ultérieurement; tout est ramené aux conditions régulières et l'aiguille étant à la +, la concordance est rétablie.

560. Télégraphe Morse. — Le système Morse qui porte le nom du savant américain qui l'a inventé en 1837 est basé sur la différenciation des signaux à la fois par la durée et par le nombre des émissions de courant. Il a été modifié à diverses reprises, nous allons le décrire sous la forme qu'il a maintenant (fig. 437).

Le manipulateur est formé d'un levier métallique FD susceptible d'osciller autour de l'axe horizontal B qui communique avec la ligne; à une extrémité il porte une vis de butée D dont on fait varier la position pour le réglage; au repos, un ressort R maintient cette vis appliquée contre une pièce métallique qui est en relation avec la sonnerie ou le récepteur. A l'autre extrémité, le levier présente une

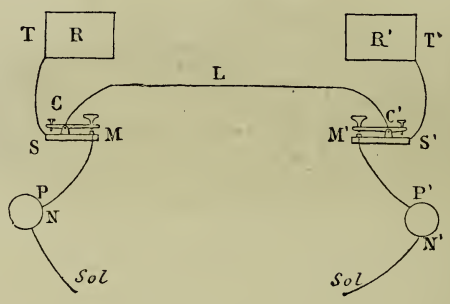


Fig. 438.

poignée C que l'opérateur tient à la main et à l'aide de laquelle il peut abaisser le levier. Sous celui-ci et du même côté que la poignée se trouve une pointe métallique F située en face d'un contact E contre lequel elle vient buter quand on appuie sur la poignée; ce contact communique avec la pile P.

Lorsque l'appareil est au repos, la pile P (fig. 438) ne fonctionne pas, puisque le contact n'est pas établi en M; si un courant est émis dans la ligne venant d'un autre bureau, il traverse le manipulateur et agit sur la sonnerie ou fait fonctionner le récepteur R. Lorsque l'on veut expédier une dépêche, on met la sonnerie et le récepteur hors circuit, puis l'on agit sur le manipulateur en appuyant à intervalles réglés sur la poignée M.

L'effet du manipulateur est très simple : le courant passe tant que le levier reste abaissé, il est interrompu dès qu'on relève le

levier ou dès que, abandonné à lui-même, il se relève sous l'action du ressort.

On pourra donc envoyer dans la ligne et, par suite, dans le récepteur, des courants dont on fera varier à volonté le nombre et la durée. Avant d'indiquer comment ces émissions de courant peuvent être utilisées pour fournir des signaux, il convient de décrire le récepteur.

La pièce essentielle du récepteur (fig. 437) est un électro-aimant G auquel vient aboutir le fil de ligne et dont le fil, d'autre part, est mis en communication avec la terre : les courants émis par le manipulateur traverseront donc cet électro-aimant en nombre égal et avec la même durée. Devant les pôles de cet électro-aimant se trouve une traverse de fer doux D portée par un des bras d'un levier mobile autour d'un axe horizontal; l'extrémité de ce bras oscille entre deux

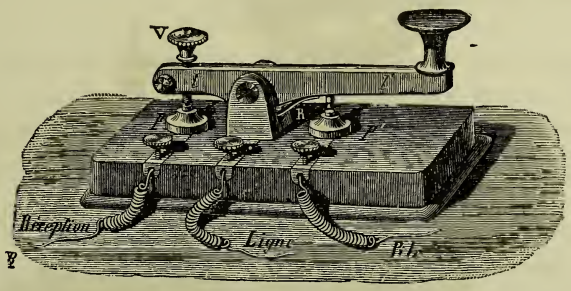


Fig. 439. — Manipulateur Morse.

pointes qui limitent sa course, ces pointes sont l'extrémité de vis que l'on peut déplacer pour obtenir le réglage. Enfin un ressort à boudin A dont on peut également régler la tension est fixé au levier et tend à l'écarter de l'électro-aimant et l'écarte en effet lorsque l'électro-aimant est inactif; mais lorsque le courant de la ligne arrive au récepteur et traverse l'électro-aimant, celui-ci agit par attraction sur le fer doux qu'il attire effectivement parce que la tension du ressort a été choisie de manière à être moins grande que la force de l'aimant. Le levier s'abaisse donc aussi longtemps que le courant passe et se relève sous l'action du ressort à l'instant où le courant cesse de passer; il résulte de ce mode de fonctionnement que le nombre et la durée des mouvements du levier sont déterminés par le nombre et la durée des émissions de courant et, par suite, par le nombre et la durée des mouvements du manipulateur.

A l'aide de ces mouvements du manipulateur et du récepteur qui

dépendent l'un de l'autre, on a pu créer un alphabet conventionnel, chaque signal (lettre, chiffre, signe de ponctuation, phrases conventionnelles, etc.) étant représenté par un certain nombre de mouvements ayant chacun une durée déterminée : pour qu'il ne soit pas nécessaire d'employer un trop grand nombre de mouvements pour chaque signal (on ne dépasse pas 6), on a admis des mouvements de longue durée et de courte durée, que l'on peut combiner comme l'on veut.

On voit aisément que le récepteur comprend la pièce essentielle

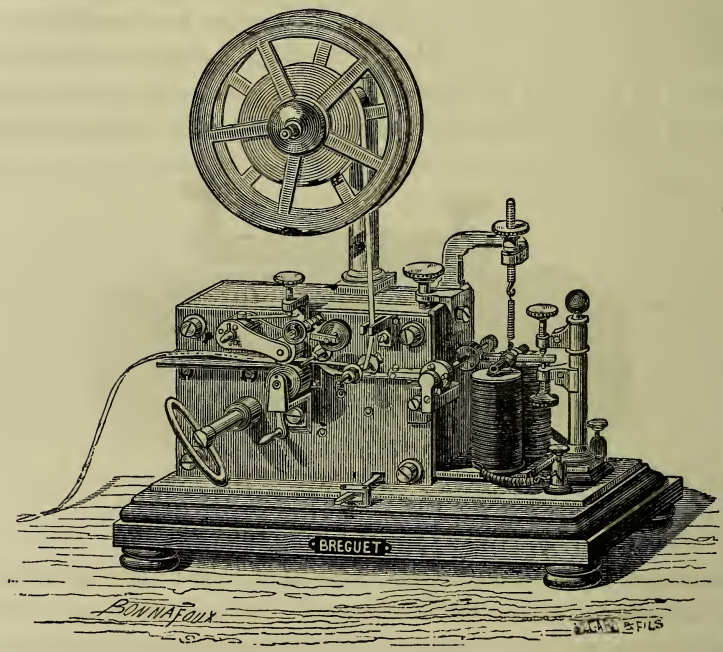


Fig. 440. — Récepteur Morse.

d'un relais (552) : un levier oscillant sous l'influence d'un électro-aimant entre deux vis de butée. Moyennant quelques dispositions de détail, on utilise en effet de cette manière ces récepteurs ; on peut également les réunir deux à deux pour servir de translateurs.

561. — Les conventions faites, on conçoit aisément comment on transmet une dépêche, lettre par lettre, en agissant sur le manipulateur de manière à provoquer l'émission d'une série de courants longs ou courts dans l'ordre convenu. Mais comment, au récepteur, peut-on se rendre compte de la suite de ces mouvements pour en conclure la nature des lettres envoyées successivement ?

Le moyen le plus simple consiste à disposer l'appareil de manière que le choc du levier du récepteur contre les vis de butée produise des sons assez intenses pour être perçus à distance; on place, par exemple, pour renforcer les sons produits, l'appareil sur une boîte sonore. Avec de l'habitude, en arrive à distinguer aisément les sons produits et à évaluer leur durée ainsi que la durée des intervalles qui les séparent; on peut donc reconnaître les signaux envoyés et les transcrire au fur et à mesure de leur émission comme on écrit pour une dictée par épellation.

Mais le plus souvent, l'appareil est disposé de manière à enregistrer automatiquement les mouvements du levier : à cet effet, le levier DO (fig. 437) se prolonge au delà de l'axe de rotation et porte un style Q qui s'appuie sous un disque contre lequel glisse une bande de papier qui sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie se déplace uniformément. Le style est écarté du papier tant que l'électro-aimant n'agit pas; lorsque celui-ci attire le fer doux, le style trace un trait d'autant plus long que le courant dure plus longtemps; il se produit donc sur la bande des traits de longueur variable qui sont en rapport avec la durée des mouvements du manipulateur.

La bande de papier est enroulée sur un tambour fou sur son axe; elle passe entre deux cylindres (dont l'un est mû par le rouage d'horlogerie) qui agissant comme un laminoir l'entraînent malgré les frottements qu'elle éprouve. Un système d'embrayage permet à volonté d'arrêter le mouvement ou de laisser se produire le déroulement de la bande.

Primitivement le style était constitué par une pointe mousse et produisait sur le papier un gaufrage ; outre qu'il y avait une certaine résistance à vaincre, les traits formés n'étaient pas toujours très lisibles; maintenant le style est remplacé par une lame d'acier présentant une arête aiguë qui presse le papier contre un disque de cuivre mince ou *molette* dont la tranche est constamment recouverte d'encre, parce que d'autre part cette molette roule sur un tampon cylindrique imbibé d'encre. Lors donc que la lame se soulève, elle presse le papier contre la molette et produit un trait qui cesse lorsque la lame s'abaissant, le papier ne touche plus la molette. On a donc ainsi des traits faciles à distinguer.

On est convenu pour la formation des signaux d'employer des traits longs et des traits plus courts ayant le tiers de la longueur des précédents et que l'on désigne sous le nom de points : l'intervalle qui sépare les traits et les points dont l'ensemble forme un signal doit être égale à peu près à la longueur d'un point; l'intervalle entre

deux lettres doit être plus considérable et plus considérable encore l'intervalle entre deux mots. Ces différences se produisent aisément par les mouvements plus ou moins rapides d'élévation ou d'abaissement de la poignée du manipulateur, et des personnes exercées peuvent arriver à une transmission très rapide : on a pu atteindre jusqu'à 20 mots par minute; on peut compter pratiquement sur 25 dépêches par heure.

Il nous paraît sans intérêt de donner les combinaisons qui ont été adoptées conventionnellement pour représenter les lettres et les chiffres; ces conventions sont indiquées dans tous les traités et manuels de télégraphie.

Nous ferons remarquer que les lettres ou chiffres diffèrent en somme les uns des autres par les groupements de deux signaux combinés diversement comme nombre et comme ordre : ce même alphabet conventionnel pourra donc être utilisé toutes les fois que l'on disposera de deux signaux différents, quelle que soit d'ailleurs leur nature, que l'on pourra faire se succéder à volonté dans un ordre déterminé.

562. Télégraphe a aiguilles de Wheatstone. — Parmi les systèmes employés pour utiliser les changements de sens, les inversions du courant, le plus simple est sans contredit celui de Wheatstone qui repose sur l'action directe du courant sur l'aiguille aimantée.

Le manipulateur est un levier analogue, par exemple, au manipulateur Morse ; l'axe communique avec la ligne et dans les deux positions extrêmes, par des dispositions variables mais aisées à imaginer, on établit d'un côté la communication entre le pôle + de la pile et le manipulateur et entre le pôle — et la terre; et de l'autre côté entre le pôle — de la pile et le manipulateur et entre le pôle + et la terre. De cette façon suivant qu'on lève ou qu'on baisse la poignée du manipulateur on établit dans la ligne un courant dans un sens ou dans le sens contraire.

Le récepteur est un véritable galvanomètre dans lequel l'aiguille aimantée, mobile autour d'un axe horizontal, est placée verticalement lorsqu'elle est au repos : dès que le courant passe l'aiguille se dévie et le sens de la déviation dépend du sens du courant. Si donc sur l'axe de l'aiguille aimantée on place une aiguille légère, celle-ci sera entraînée dans un sens ou dans l'autre suivant le sens du courant.

On dispose donc, à la réception, de deux signaux différents que l'on peut produire à volonté à l'aide du manipulateur. Comme nous l'avons dit, on peut adopter l'alphabet Morse pour ce système de transmission.

Il est inutile d'insister sur ce système qui, peu employé maintenant, présente, entre autres, l'inconvénient de ne laisser aucune trace des signaux.

On retrouve le même principe dans certains appareils qui servent aux transmissions transatlantiques; nous y reviendrons lorsque nous aurons exposé d'une manière générale les conditions spéciales de ce genre de transmission.

Le principe de l'inversion a été appliqué à des appareils de formes très variées, mais ils ne sont pas usités et nous ne les décrirons pas à l'exception d'un système nouveau qui paraît présenter des avantages très réels et qui est une modification du système Morse, le télégraphe Estienne.

563. Télégraphe Estienne. — Les signaux du télégraphe Morse peuvent prêter aisément à la confusion lorsqu'ils ne sont pas produits d'une manière très régulière; on conçoit qu'un point peut être pris pour un trait si l'émission du courant a été un peu trop prolongée ou que, inversement, un trait peut être confondu avec un point si l'émission est trop brève; de là résultent nécessairement des erreurs de lettres, erreurs qui peuvent avoir de graves conséquences. M. Estienne a cherché un système qui admettant en principe l'alphabet Morse, ne puisse présenter ces inconvénients.

Ce système a été soumis pendant un certain temps déjà à l'épreuve de la pratique et il a donné de bons résultats; nous allons le décrire dans ses parties essentielles en commençant par le récepteur.

La différence principale consiste en ce que les traits et les points au lieu d'être obtenus par des tracés que l'on fait durer plus ou moins longtemps, sont obtenus par impression, à l'aide de plumes de largeur différente qui, par leur application sur le papier, donnent des traits de dimensions différentes correspondant respectivement au trait et au point de l'alphabet Morse. La production de chaque signal exigeant toujours le même temps, il a été possible de changer la direction des traits et de placer les plumes perpendiculairement à la direction dans laquelle le papier est entraîné.

Chaque plume (fig. 442) est constituée par deux lamelles métalliques comprenant entre elles un morceau de cuir; ces plumes B,B′ (fig. 441) sont placées à côté l'une de l'autre de manière que, les lamelles étant placées verticalement, leur partie inférieure plonge dans un réservoir F contenant une encre à l'aniline d'une composition spéciale.

L'encre monte par capillarité dans le cuir; lorsque le bord horizontal supérieur de cette lame, maintenue par les lamelles

métalliques, vient à être pressé contre la bande de papier GHI qui se déroule, il y laisse une trace ayant la longeur de la plume ; sa largeur, qui dépend du déplacement du papier pendant l'impression du signal, sera en relation avec le temps de l'émission du courant; en général, il convient d'obtenir des traits de même largeur et naturellement les moins larges possible pour diminuer la durée de la transmission, mais comme nous le dirons, ces variations de largeur sont de peu d'importance.

Chaque plume est montée sur un levier AB, A'B' mobile autour d'un axe situé à l'extrémité supérieure en A,A'; à la position de repos elles se trouvent un peu au-dessous du cylindre H sur lequel passe la bande de papier qui se déroule. Quand on déplace le levier, la

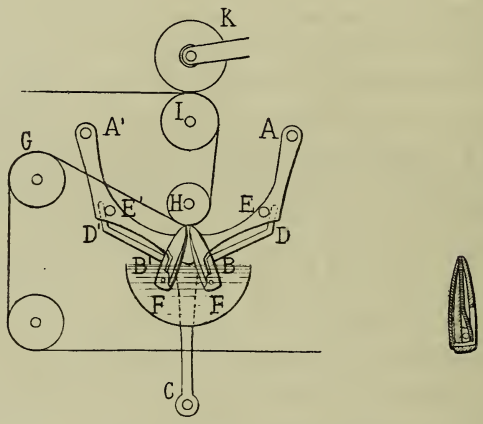


Fig. 441 et 442. — Télégraphe Estienne.

plume s'élève légèrement en tournant autour de l'axe et vient s'appuyer sur le papier, précisément le long de la génératrice inférieure, si l'appareil est bien réglé ; en faisant mouvoir successivement les leviers on aura donc, successivement aussi, des traits longs et des traits courts. Le mouvement de ces leviers est déterminé par l'oscillation d'une fourche CDD' mobile autour d'un axe C situé à la partie inférieure de l'appareil et qui déplace l'une ou l'autre plume suivant qu'elle agit dans l'un ou l'autre sens.

La production d'un trait long ou d'un trait court, et par suite la formation des signaux étant liées aux oscillations de cette fourche, il nous reste à indiquer comment ces oscillations sont obtenues.

L'axe C (fig. 443) de la fourche traverse l'appareil et est solidaire,

de l'autre côté, d'une lame verticale de fer doux L L′, de telle sorte que les oscillations de ces deux pièces sont simultanées. La lame de fer doux est polarisée, aimantée par influence, parce que son extrémite inférieure est au-dessus et à une très petite distance d'une pièce polaire N dépendant d'un aimant fixé sous le socle ; l'extrémité supérieure de la lame de fer doux, dont l'aimantation est de même nom que celle de la pièce polaire, est placée entre les deux pôles PP′ d'un électro-aimant dont le fil est en communication par la ligne avec le manipulateur placé à l'autre station. Ce manipulateur est un inverseur pouvant envoyer dans la ligne des courants dans l'un ou l'autre sens ; lorsque, par exemple, un courant direct sera émis et

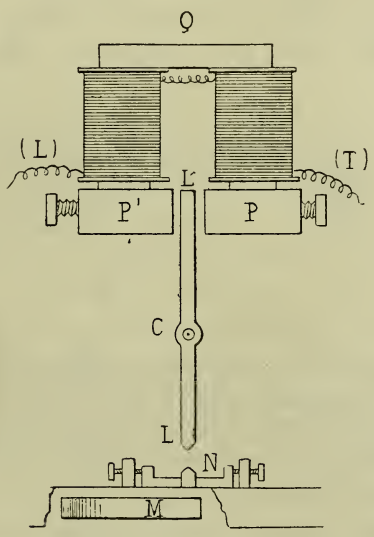


Fig. 443.

traversera l'électro-aimant, la lame polarisée basculera, attirée par l'un des pôles et repoussée par l'autre ; elle reviendra à la verticale si le courant cesse de passer ; elle s'inclinera en sens contraire si l'on envoie dans la ligne un courant inverse qui produira dans l'électro-aimant une polarisation inverse de la précédente. Il n'y aura donc aucun signal produit sur le papier tant que le courant ne passera pas, et il y aura production d'un trait long ou d'un trait court suivant que l'on émettra au manipulateur un courant dans un sens ou dans l'autre.

564. — Examinons maintenant le manipulateur dit *manipulateur inverseur* (fig. 444 à 446) : il se compose essentiellement de trois

pièces mobiles distinctes : deux leviers A et A′ et une lame de ressort B.

Les leviers A et A′ sont terminés à une extrémité par des touches en ébonite *a*, *a′* reposant sur la tige du levier qui est en laiton. L'extrémité opposée qui est également métallique est séparée du corps par une partie isolante H, en ébonite, par exemple.

Ces leviers sont mobiles autour d'axes en acier O qui pénètrent dans un support métallique DD′ qui est isolé et communique avec le fil de ligne (L). Sous chaque levier se trouvent deux contacts EF situés

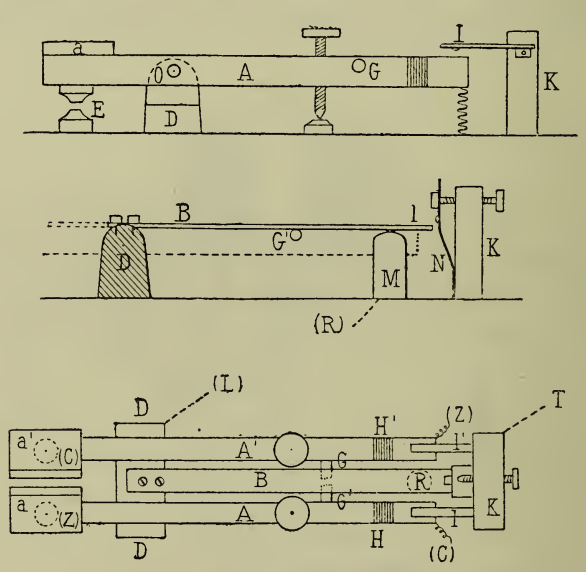


Fig. 444, 445, 446. — Télégraphe Estienne; manipulateur. — Fig. 444. Élévation. Fig. 445. Coupe. Fig. 446. Plan.

de part et d'autre de l'axe de rotation et placés au-dessus de pièces métalliques contre lesquelles ils peuvent venir buter. Abandonné à lui-même, le levier bascule de manière à ce que le contact ait lieu en F : le contact se produit en E, au contraire, si l'on vient à presser sur la touche. Vers l'extrémité opposée deux chevilles G et G′ sont implantées sur la face interne des touches; enfin la partie métallique isolée porte un fil très flexible qui établit la communication avec un des pôles de la pile; au-dessus de cette partie se trouve une petite lame de ressort I que le levier vient toucher lors qu'on le soulève en appuyant en *a;* ces ressorts sont fixés à un support K qui communique avec la terre.

Les pièces métalliques sur lesquelles s'établit le contact en E communiquent avec les pôles de la pile; mais comme il est indiqué sur la figure un pôle de la pile, le zinc par exemple, communique avec le contact correspondant à l'une des touches et avec le fil flexible qui aboutit à l'extrémité isolée de l'autre touche.

Entre les deux touches se trouve une lame de ressort L qui est fixée à une extrémité sur le support D; vers l'autre extrémité, elle s'appuie à l'état de repos sur une enclume métallique isolée M qui est en communication avec le récepteur R de la même station. Lorsqu'on appuie sur une des touches, la cheville G (ou G') rencontre la lame et la soulève, son extrémité *l* quitte l'enclume et vient frotter en passant sur un bouton métallique porté sur une lame de ressort N qui est fixée au support K; lorsqu'on lâche la touche, le contact s'établit à la descente avec le ressort N, puis la lame L vient reposer sur l'enclume.

Il est facile de se rendre compte du fonctionnement de l'appareil : quand le manipulateur est immobile, le récepteur de la station est en communication avec la ligne par l'intermédiaire de l'enclume M, de la lame de ressort L et du support D.

Supposons maintenant que l'on appuie sur une touche, A' par exemple; dans ce mouvement : 1° la lame B sera soulevée, s'écartera de l'enclume; 2° son extrémité *l* viendra frotter contre le ressort N; puis 3° le mouvement continuant la partie métallique H' viendra rencontrer le ressort I' en même temps que, à l'extrémité opposée *a'*, le contact s'établit en E. Si alors on abandonne la touche le levier reviendra à la position de repos; 4° le contact cessera entre H' et I'; 5° la lame B frottera par son extrémité contre le ressort N et enfin cette lame viendra reposer sur l'enclume M. Par suite de ces divers mouvements, les effets suivants se produiront : 1° l'appareil récepteur de la station est mis hors du circuit; 2° la ligne est mise en communication avec la terre et se décharge si elle contenait encore de l'électricité; 3° le pôle cuivre de la pile est mis en communication avec la ligne par l'intermédiaire du levier et du support D, en même temps que le pôle zinc de la pile est mis en communication avec la terre par l'intermédiaire du fil flexible de la partie métallique H', du ressort I' et du support K; le fil de ligne sera donc parcouru par un courant allant du manipulateur au récepteur de l'autre station; 4° le courant cessera; 5° la ligne se déchargera au moins en partie puisqu'elle est mise en communication avec la terre.

Par suite de cet ensemble d'actions, un signal sera produit au

récepteur. Si on renouvelle le même mouvement on imprimera donc le même signal autant de fois qu'il sera nécessaire. Mais si l'on vient à agir sur l'autre levier les effets, tout analogues, seront exactement inverses; il y aura donc production dans la ligne d'un courant de sens opposé au précédent et, par suite dans le récepteur, on obtiendra l'autre signal. On peut donc, en agissant sur les touches obtenir dans le récepteur des signaux suivant un ordre, une succession déterminée.

565. — Dans la description que nous venons de donner, nous nous sommes attaché à indiquer le principe du système sans entrer dans les détails dont quelques-uns sont analogues à ceux que l'on trouve dans les autres appareils et dont quelques-uns sont commodes sans présenter un intérêt spécial.

Les avantages de cet appareil sont d'abord l'impossibilité de confondre les signaux, trait ou point, comme nous l'avons indiqué au début, puisque la production de chaque signal est indépendante du temps pendant lequel la plume a agi; le seul inconvénient qui résulte d'une variation dans la durée de l'émission consiste dans la variation d'épaisseur; mais l'épaisseur n'intervient pas, la valeur du signal étant déterminée par le groupement des traits longs et courts. Ajoutons que cette variation de largeur peut même être utilisée et que, en faisant varier la durée du contact on peut avoir deux nouveaux signaux, un trait long et un trait court de grande largeur, ce qui, joint aux signaux ordinaires, permet d'introduire des abréviations dans l'écriture.

Les signaux s'obtiennent par le mouvement des deux touches à l'aide de deux doigts, ce qui est moins fatigant que l'action du manipulateur Morse.

Enfin, l'étendue occupée par un mot, par une dépêche est nécessairement moindre dans ce système que dans le système Morse, puisqu'il y a le même nombre de signaux, mais qu'ils sont placés transversalement au lieu d'être disposés longitudinalement : cet avantage n'est pas négligeable lorsqu'il s'agit de la transmission de très nombreuses dépêches.

566. Télégraphe imprimeur Hughes. — Le système Hughes est caractérisé au point de vue du résultat final en ce qu'il donne directement la dépêche écrite en caractères ordinaires et non plus en signaux conventionnels comme le télégraphe Morse. Mais il est caractérisé au point de vue de son fonctionnement en ce qu'il repose sur la production de signaux déterminés par la durée qui sépare les émissions successives du courant; chaque signal correspondant ainsi

à une seule émission de courant, ce qui lui assure des avantages particuliers comme nous le dirons par la suite.

Le fonctionnement du système repose sur le synchronisme aussi parfait que possible du mouvement de rotation de deux pièces dont l'une appartient au manipulateur et l'autre au récepteur; quelle que soit la perfection de la construction, on ne peut obtenir par de simples dispositions mécaniques ce synchronisme *parfait* entre des appareils situés à grande distance; c'est le courant électrique même envoyé dans l'appareil qui, comme nous l'expliquerons, assure et maintient ce synchronisme.

Concevons qu'un frotteur métallique F (fig. 447) tourne d'un mouvement uniforme autour d'un axe vertical A en s'appuyant sur un plan isolant : l'axe vertical métallique est en communication avec la

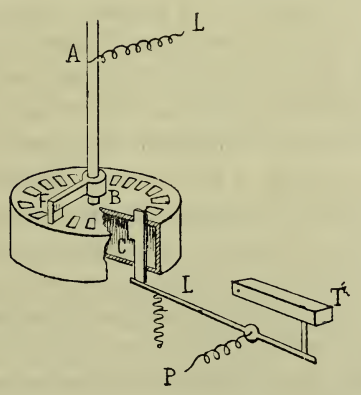


Fig. 447. — Principe du télégraphe Hughes : manipulateur.

ligne L. Sur le parcours du frotteur des ouvertures sont pratiquées, régulièrement disposées le long d'une circonférence, au nombre de 26 par exemple : dans ces ouvertures peuvent se mouvoir des chevilles métalliques C ou goujons qui, au repos sont maintenus abaissés par l'action d'un ressort, mais que l'on peut faire saillir par l'intermédiaire de levier L; ces leviers aboutissent d'autre part aux touches T d'un clavier sur lequelles sont inscrites une + et les lettres de l'alphabet, de telle sorte que, lorsqu'on appuie sur une touche, le goujon correspondant se soulève; il est rencontré par le frotteur dans sa rotation et comme tous les goujons sont en rapport avec la pile, il y a un courant émis dans la ligne au moment du contact, mais ce courant ne dure que le temps même du contact; si le goujon reste soulevé, le frotteur le rencontre à chaque tour

et un courant très court est émis à chaque contact, c'est-à-dire après des temps rigoureusement égaux puisque le mouvement de rotation est absolument uniforme. Si de même, on a deux goujons soulevés, il y a deux émissions de courant et le temps qui les sépare est rigoureusement proportionnel à leur distance, c'est-à-dire au nombre de goujons qui les sépare, ce temps étant $\frac{1}{26}$, $\frac{2}{26}$, $\frac{3}{26}$... du temps d'un tour entier suivant que les goujons seront voisins immédiatement, ou séparés par 1, 2... autres goujons, c'est-à-dire suivant que leur distance angulaire sera $\frac{1}{26}$, $\frac{2}{26}$, $\frac{3}{26}$... de circonférence.

Dans le récepteur, il existe une roue dite *roue* des types qui tourne autour d'un axe horizontal, d'un mouvement uniforme et absolument avec la même vitesse que le frotteur du manipulateur; cette roue porte sculptés en relief sur sa tranche et renversés, comme les caractères d'imprimerie, une + et les 25 lettres de l'alphabet; ces caractères sont maintenus constamment encrés; au-dessous de cette roue et à une très petite distance se trouve une bande de papier portée par un levier dont les mouvements réglés par une came sont déterminés par le passage d'un courant dans un électro-aimant. Quand le courant passe, la bande de papier est rapidement soulevée, s'appuie sur la roue des types de telle sorte que la lettre qui est au point le plus bas de cette roue s'imprime sur le papier; puis brusquement la bande de papier s'écarte en même temps qu'elle avance d'une petite quantité, de manière que l'impression qui se fera lors du passage d'un nouveau courant se fasse à côté de la lettre précédemment obtenue.

567. — Ceci posé, lorsque l'appareil est bien réglé et prêt à fonctionner, le frotteur du manipulateur passe au-dessus du goujon qui correspond à la + au moment précis où la + de la roue des types est au point le plus bas, c'est-à-dire en face de la bande de papier. A partir de cet instant, le frotteur passera successivement au-dessus de chaque goujon à l'instant où la lettre correspondante de la roue des types sera au point le plus bas et cette concordance se continuera indéfiniment puisque, par un réglage continuel, le synchronisme des deux mouvements est rigoureusement maintenu. (Nous disons, pour simplifier, que les deux effets doivent avoir lieu précisément au même instant : en réalité, il n'en est pas exactement ainsi et ils doivent être séparés par un intervalle de temps égal au temps que le courant met à parcourir la distance qui sépare les deux stations.)

Imaginons que nous voulions transmettre un mot; au manipula-

teur, on abaissera la 1re lettre de ce mot et lorsque le frotteur passera sur le goujon correspondant, un courant sera émis dans la ligne, arrivera au récepteur passera dans l'électro-aimant et provoquera dès lors l'impression de la lettre qui est en bas de la roue des types, c'est-à-dire de la lettre correspondante à celle qui est sur la touche abaissée. L'opérateur laisse se relever la touche et abaisse celle qui représente la 2e lettre du mot, les mêmes actions se produisent et la 2e lettre s'imprime de même et il en est ainsi successivement pour toutes les lettres, le mot se trouve donc ainsi imprimé en entier.

On voit aisément un avantage immédiat de ce système comparé aux systèmes Morse et Bréguet; c'est que dans ceux-ci il faut plusieurs émissions de courant pour transmettre une lettre, tandis qu'il n'en faut qu'une pour chaque lettre dans le système Hughes; aussi la rapidité de transmission est-elle beaucoup plus considérable et peut atteindre 60 dépêches par heure. D'autre part, il présente le double avantage de donner les dépêches sous une forme matérielle et de les fournir écrites en caractères ordinaires, ce qui évite les erreurs ou omissions et la traduction nécessaire dans le cas de signaux conventionnels.

568. — Donnons maintenant quelques détails sur les points les plus importants du manipulateur et du récepteur.

Dans chaque appareil (fig. 448) il existe à la fois le récepteur et le manipulateur; la roue des types et le frotteur sont reliés par l'intermédiaire de roues d'angles de telle sorte que leur mouvement est identique. Ce mouvement est produit par un mécanisme quelconque, un mécanisme d'horloge à poids en général; cependant lorsque l'on emploie plusieurs appareils dans le même bureau, il peut y avoir intérêt à employer un moteur à eau ou un moteur électrique. L'uniformité du mouvement est obtenu par l'emploi d'un régulateur à pendule conique à ressort qui est relié au rouage : on peut modifier la longueur de la tige à l'aide d'une vis, de manière à faire varier par degrés insensibles la vitesse de rotation. Voyons quelles dispositions ont été adoptées pour assurer le synchronisme absolu des mouvements des deux appareils qui sont en communication pour une transmission.

Pour établir le synchronisme une des stations envoie une lettre déterminée, toujours la même et à l'autre station on agit sur le régulateur jusqu'à ce que, pendant plusieurs tours, la lettre s'imprime nettement, mais cette condition remplie, comment la maintenir? et d'ailleurs le synchronisme n'est jamais absolu et s'il existait une

différence telle petite fût-elle, les effets s'accumuleraient avec le nombre des tours, et après un certain temps la concordance aurait

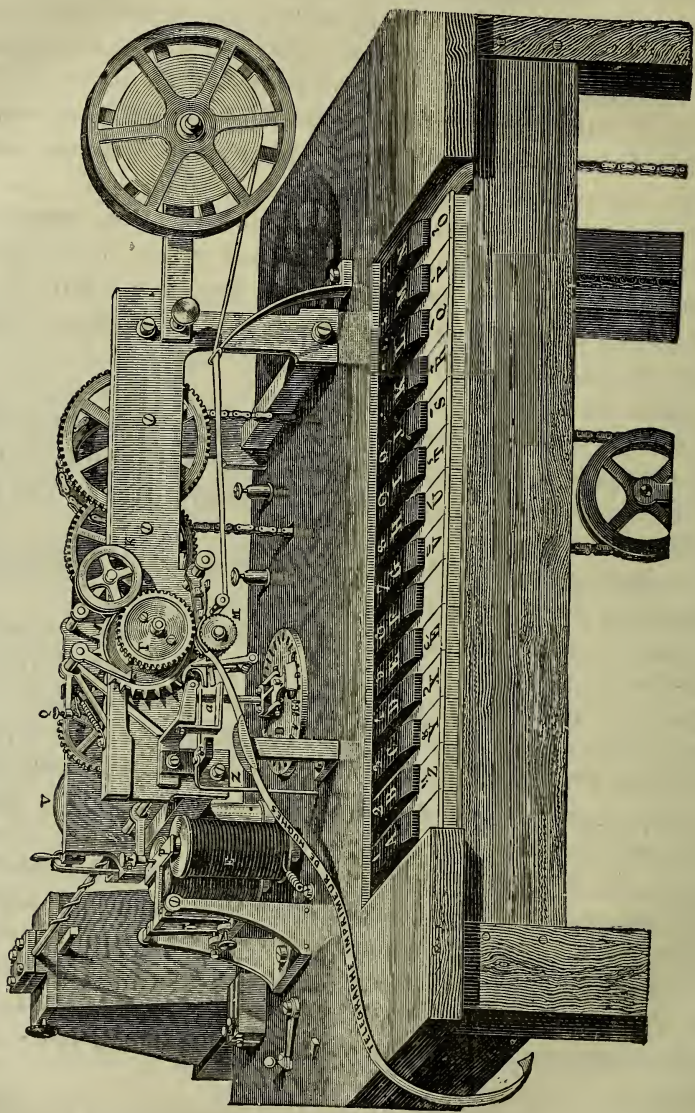


Fig. 448. — Télégraphe imprimeur Hughes. (*Bréguet.*)

complètement disparu. Aussi l'appareil effectue-t-il la correction à chaque tour à l'aide *de la roue et de la came correctrices*. Cette roue est portée sur le même axe que la roue des types de laquelle elle est

solidaire; elles sont portées sur un manchon commun qui glisse à frottement doux sur l'axe de rotation du rouage qui fait environ 120 tours par minute; les deux roues tournent avec cet axe si elles n'éprouvent aucune résistance, mais elles peuvent s'arrêter sans que l'axe cesse de tourner si ces roues rencontrent un obstacle; la roue correctrice (fig. 449) présente des dents d'acier trempé en nombre égal au nombre des saillies de la roue des types.

La came correctrice est une pièce de section à peu près ovale qui tourne avec le mécanisme qui détermine l'impression : lorsque, au moment de l'impression, le caractère qui va s'imprimer est *rigoureusement* au point le plus bas de sa course, la came correctrice vient passer entre deux dents de la roue correctrice sans le toucher, comme elle ne fait que passer, elle n'arrête pas ces dents; mais si la roue des types n'est pas *rigoureusement* à la position qu'elle doit

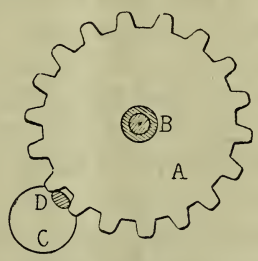


Fig. 449.

occuper au moment de l'impression, la came bute contre une des dents de la roue correctrice, la dent précédente si la roue des types et la roue correctrice sont en retard, la dent suivante si les roues sont en avance; dans le premier cas, la came, par son mouvement pousse la dent qu'elle touche et avec elle les roues; dans le second cas, elle arrête momentanément la dent suivante et les roues, et, dans tous les cas, elle remet les roues rigoureusement à la position qu'elles doivent occuper normalement à l'instant même de l'impression. Le réglage se fait donc chaque fois qu'une lettre s'imprime.

Lorsqu'on ne transmet pas et que les appareils continuent à tourner, le réglage ne se fait pas et au bout d'un certains temps la concordance cesse d'exister; la came correctrice ne peut agir efficacement que si la différence est moindre qu'une dent, elle ne suffit donc pas si la différence de réglage s'est produit pendant un certain

temps : il faut alors avoir recours à une disposition particulière assez compliquée et qui repose sur des combinaisons mécaniques dans lesquelles l'électricité ne joue aucun rôle et que, par suite, nous ne décrirons pas.

La came correctrice est solidaire de la came qui produit l'impression et d'une autre qui fait avancer le papier après l'impression : elles sont montées sur un arbre creux qui entoure un axe mobile qui ne l'entraîne pas, mais qui porte une roue à rochet, l'axe creux porte un cliquet qui peut être en communication avec la roue et établit alors la solidarité entre les deux axes, les cames sont entraînées dans le mouvement de rotation : si le cliquet est relevé la solidarité cesse et les cames restent immobiles.

Le cliquet est maintenu relevé par un levier qui se trouve appuyé entre le contact qui est au-dessus de l'électro-aimant et qui y reste tant que le courant émis par le manipulateur arrive à l'électro-aimant (qui est disposé d'une manière particulière comme nous allons l'exposer) le contact se détache sous l'action du ressort antagoniste, le cliquet tombe, les trois cames agissent produisant la correction, l'impression, l'avancement du papier. Enfin, avant que l'axe n'ait fait un tour complet une quatrième came vient agir sur le levier et le ramène à sa position primitive ainsi que le contact; le cliquet se trouve alors relevé et l'arbre des cames cesse de tourner jusqu'à ce qu'un nouveau courant soit émis.

569. — Le passage du courant dans l'électro-aimant produit dans cet appareil un effet différent de celui que l'on observe ordinairement ; ce résultat, qui a été reproduit dans d'autres appareils, a pour but de produire un déclenchement très brusque et très rapide. Il importe d'y insister un peu.

Cet électro-aimant a pour noyau un aimant, de telle sorte que quand le courant ne passe pas, le contact est maintenu appuyé sur le noyau : on a disposé un ressort antagoniste, réglé de manière à avoir une puissance un peu inférieure à celle de l'aimant, de telle sorte qu'il ne peut détacher le contact. Mais si l'on envoie dans le fils de l'électro-aimant un courant dont le sens soit tel qu'il ait pour effet de diminuer l'aimantation (ou plutôt, ce qui revient au même comme effet, d'en faire naître une de sens opposé), le ressort détachera le contact et l'entraînera brusquement.

Il est facile de se rendre compte que l'action doit être bien plus énergique avec cette disposition qu'avec la disposition ordinaire où l'électro-aimant agit par attraction. Supposons que le courant envoyé dans l'électro-aimant soit suffisant pour annuler l'effet total

de l'aimant, le mouvement se produira immédiatement sous l'influence de la tension du ressort qui a toute sa valeur. Dans la disposition inverse, le courant aurait produit la même action et la même aimantation ; mais l'attraction de l'aimant se serait produite à distance, ce qui aurait considérablement diminué la valeur de la force attractive et par suite la rapidité, la brusquerie de l'action.

570. Transmission automatique des dépêches. — L'augmentation de puissance d'une ligne peut être obtenue par l'emploi d'appareils produisant automatiquement la transmission et capables de fonctionner plus rapidement que ne peuvent le faire les opérateurs ; la transmission doit alors être précédée d'un travail préparatoire mais un seul transmetteur peut suffire pour expédier la besogne préparée par plusieurs personnes.

On peut concevoir un mode de transmission simple pour les signaux Morse ; le transmetteur consisterait en une plaque métallique reliée à la pile et sur laquelle appuierait un balai communiquant avec la ligne, ce qui ferait passer le courant d'une manière continue; si l'on intercale du papier entre la plaque et le balai, le courant sera interrompu. Faisons glisser entre la plaque et le balai une bande de papier présentant des découpures, le courant passera ou sera interrompu suivant que le balai sera au-dessus d'une découpure ou au-dessus d'une partie pleine. Si, en particulier, les découpures consistent en fentes allongées et en points, leur passage sous le balai enverra dans la ligne des courants présentant une certaine durée et des courants brefs, qui, arrivant au récepteur produiront des traits et des points, c'est-à-dire les éléments des signaux Morse. Ce procédé simple n'a pas donné de bons résultats dans la pratique, les contacts notamment ne s'établissaient pas bien.

Cette idée de la transmission antomatique a été reprise par Wheatstone qui a imaginé un appareil qui satisfait à tous les besoins d'une exploitation courante. Nous allons indiquer le principe de cet appareil.

Considérons un récepteur Morse qui serait actionné par un relais polarisé, il donnera les signaux élémentaires par des successions de courants alternatifs; supposons qu'un courant détermine l'application de la molette sur le papier, il se produira un trait qui se prolongera, même après la cessation du courant et jusqu'à l'émission d'un courant inverse qui agira sur le relais et produira l'éloignement de la molette. On produira donc un point en envoyant dans la ligne un courant direct suivi immédiatement d'un courant inverse tandis

qu'il se produira un trait si l'émission inverse n'a lieu qu'un certain temps après l'émission directe.

Le transmetteur peut, en principe, être réduit aux éléments suivants : un disque métallique présentant une certaine épaisseur et communiquant avec la ligne et sur la surface latérale duquel frottent deux balais communiquant l'un avec le pôle + d'une pile, l'autre avec le pôle — d'une autre pile. Une bande de papier est intercalée entre le disque et les balais; elle est percée de trous ronds disposés sur deux lignes parallèles présentant la même distance que les balais sur lesquels ils passeront quand la bande de papier sera entraînée par la rotation du disque (le mouvement d'entraînement est assuré par une série de trous régulièrement espacés dans lesquels pénètrent des dents implantées sur le disque à égale distance des balais). Chaque signal, point ou trait, correspond à deux trous, un de chaque côté de la bande de papier placés presque au même niveau s'il s'agit d'un point, placés au contraire à une certaine distance s'il s'agit d'un trait. Le passage des deux trous rapprochés enverra sur la ligne deux courants inverses se succédant rapidement qui, agissant sur le relais polarisé donneront dans le récepteur l'action nécessaire à la production d'un point; le passage des deux trous éloignés ne fera passer le courant inverse qu'un certain temps après que le courant direct aura été établi et produira donc un trait dans le récepteur.

On peut donc en ayant des bandes présentant des perforations convenablement disposées, envoyer ainsi telle succession de signaux que l'on veut et par suite transmettre des lettres, des mots et des phrases.

571. — Les courants qui passent dans un conducteur ont pour effet de *charger* la ligne; les effets de cette charge sont négligeables lorsque les courants ne se succèdent pas trop rapidement; mais ils deviennent perturbateurs si des courants successifs sont émis avec une grande rapidité, comme cela se présente dans le cas de la transmission automatique dont nous nous occupons. Aussi doit-on employer des dispositions spéciales pour que les signaux ne présentent aucune ambiguïté. Pour arriver à ce résultat, on emploie une disposition particulière constituant la méthode de compensation. La ligne est toujours parcourue par un courant : mais s'il s'agit du courant qui produit à la réception un signal allongé un trait, on ne lui laisse pas son intensité entière jusqu'au moment où commence le courant inverse; ainsi, après le tiers du temps correspondant à ce signal, le courant est dirigé à travers une résistance qui l'affaiblit

jusqu'au moment où le temps du signal étant terminé, un courant inverse énergique se produira. Voici la disposition générale des appareils produisant cet effet.

572.—Le transmetteur comprend un balancier en ébonite A (fig. 450) auquel un mécanisme d'horlogerie communique un mouvement alternatif autour de son centre : sur ce balancier sont fixées deux chevilles métalliques *b* et *c*. Deux leviers coudés BB′ et CC′ mobiles respectivement autour des points D et E appuient par une branche contre ces goupilles et sont réunis l'un à l'autre par un ressort à hélice terminé sur les branches B′ et C′. Ils portent d'une part des aiguilles FF′ dont les extrémités sont situées au-dessous de la bande de papier perforé; d'autre part ils sont articulés à des bielles G et G′ qui, dans leurs mouvements entraînent le disque H et le font tourner d'un certain angle dans un sens, puis dans l'autre. Ce disque est divisé par une lame isolante en deux parties qui sont conductrices et sur les-

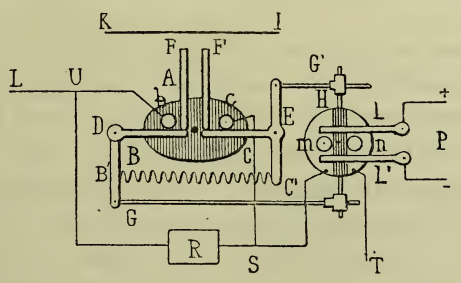


Fig. 450. — Principe du transmetteur Wheatstone.

quelles sont deux chevilles *m* et *n*; enfin deux tiges métalliques *l*, *l'* sont de part et d'autre de ces chevilles, l'une communiquant avec le pôle +, l'autre avec le pôle — d'une pile.

Les communications suivantes sont établies entre ces diverses parties, la ligne, la terre et une résistance convenablement choisie : la cheville *n* à la terre, par l'intermédiaire de la partie métallique; — la cheville *m* à un point S où se réunissent également un fil partant de *c* et un fil partant de la résistance R; — la cheville *b* et la résistance R sont reliées à un point T de la ligne; — enfin les deux leviers B′ et C′ sont reliés par l'intermédiaire du ressort à hélice.

Lorsque l'appareil est au repos, aucun courant ne passe, les leviers *l* et *l'* ne touchant pas les chevilles *m* et *n*.

Quand l'appareil fonctionne, le balancier A oscille et les leviers B et C tendent à suivre son mouvement, entraînant les aiguilles; mais

il peut arriver que l'aiguille qui monte rencontre soit une partie perforée du papier, soit une partie pleine et des résultats différents se produisent alors.

1° L'aiguille F′ (fig. 451, I) monte, rencontre une ouverture dans la bande perforée, le levier C suit la cheville *c* dans son ascension, le levier B est entraîné par la cheville *b;* le disque inverseur H s'incline établissant le contact entre *n* et *l′* et entre *m* et *l*. La pile a alors le pôle — à la terre et il s'établit un courant qui suit *l m* S et là se

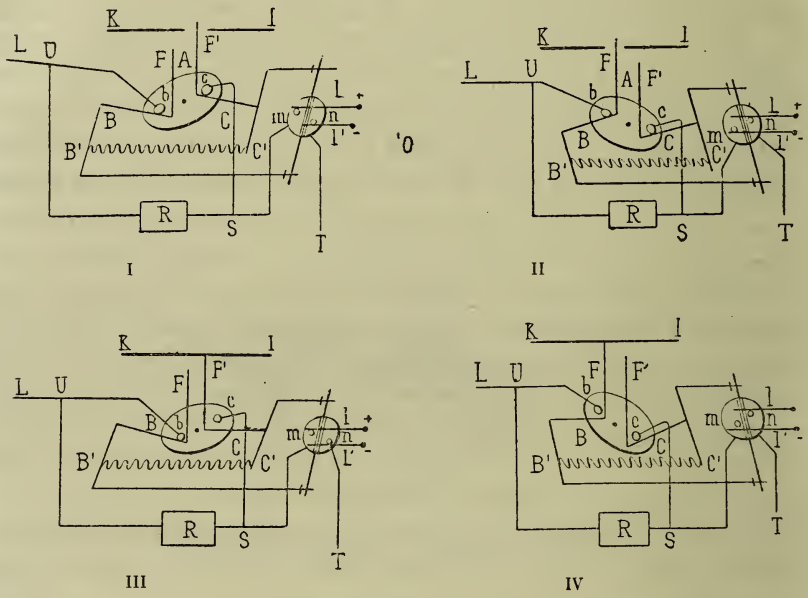


Fig. 451. — Fonctionnement du transmetteur Wheatstone.

divise; la plus grande partie suit le chemin peu résistant S*c*C′B′*b*UL; une faible partie passe par R et revient à U.

2° L'aiguille F monte (II) et rencontre une ouverture dans la bande perforée; les mouvements qui se produisent sont alors complètement inverses et il en sera de même des courants, la pile aura son pôle + à la terre et il se manifestera tant dans le circuit principal U*b*B′C′*c*S que dans la résistance et dans la ligne un courant de sens contraire au précédent.

3° L'aiguille F′ monte (III) et rencontre la bande de papier en un point non perforé, ce qui empêche la continuation du mouvement ascensionnel; le balancier continuant à tourner, le contact cesse entre la cheville *c* et le levier C. Dans cette position, la pile a son pôle — à la

terre et le courant ne peut plus passer directement à la ligne, mais passe entièrement par la résistance en suivant le chemin *m*SRUL; ce n'est donc qu'un courant très affaibli qui traverse la ligne.

4° L'aiguille F monte (IV), mais est arrêtée par la feuille de papier non perforée; c'est alors entre la cheville *b* et le levier B que cesse le contact et c'est le pôle + de la pile qui est à la terre; il y aura donc un courant très affaibli qui traversera la ligne, mais un courant inverse, par suite des communications qui s'établiront suivant *m*SRU.

573. — Ceci posé, on peut s'expliquer le fonctionnement de l'appareil : dans la bande de papier les deux trous qui représentent le signal *point* sont sur une même perpendiculaire au trou et le mouvement du papier est tel que dans deux oscillations successives les aiguilles viennent passer dans ces trous, il en résulte donc deux courants intenses, le premier direct, par exemple, qui, dans le récepteur, produit l'impression, et le second inversé qui au bout d'un temps très court arrête l'impression qui n'a dès lors produit qu'un trait bref, qu'un point.

Les trous qui correspondent aux traits et qui ne sont pas sur une perpendiculaire à la bande sont à une distance telle que l'aiguille F passant dans le trou de droite, l'aiguille F′ ne puisse passer dans le trou de gauche qu'à la fin d'une double oscillation complète. Le passage de F enverra donc un courant intense qui, au récepteur, produira l'impression; l'oscillation se continuant F′ rencontrera le papier, il en sera de même de F à l'oscillation suivante et ces deux mouvements produisent dans la ligne des courants inverses, puis directs, mais faibles et insuffisants pour produire un mouvement dans le relais du récepteur de telle sorte que l'impression continuera. Mais à l'oscillation suivante F′ passera dans le trou de gauche, ce qui produira un courant inverse qui arrêtera l'impression laquelle aura donné un trait allongé.

Dans les intervalles entre les lettres ou les mots, il n'y a pas de perforation dans la bande, les oscillations ne donneront que des courants de faible intensité insuffisante pour mettre en mouvement le relais du récepteur.

On peut se représenter ainsi la transmission de signaux. Les chiffres indiquent l'ordre des oscillations.

1	3	5	7	9	11
o	o			o	
o		o			o
2	4	6	8	10	12

1	Courant direct fort.	Commencement de l'impression.	Point.
2	— inverse fort.	Fin de l'impression.....	
3	— direct fort.	Commencement de l'impression.	Trait.
4	— inverse faible.		
5	— direct faible.		
6	— inverse fort.	Fin de l'impression.....	
7	— direct faible.		
8	— inverse faible.		
9	— direct fort.	Commencement de l'impression.	
etc., etc.			

Le fonctionnement du transmetteur automatique de Wheatstone donne de très bons résultats, on peut expédier ainsi 2200 mots à l'heure, environ.

La préparation des bandes perforées se fait mécaniquement à l'aide de perforateurs particuliers dont le détail ne touche en rien à l'électricité et sur lesquels nous n'avons pas à insister. Il est nécessaire d'avoir plusieurs perforateurs pour suffire à un seul transmetteur.

574. Des systèmes de transmission. — Tant que les communications télégraphiques n'ont pas été très étendues, on s'est borné à augmenter le nombre des fils qui desservaient une direction donnée lorsque le service y devenait très chargé. Mais l'établissement d'une ligne est coûteuse, aussi fut-on conduit à rechercher s'il ne serait pas possible de faire passer simultanément plusieurs dépêches à travers le même conducteur, cette transmission multiple pouvant avoir lieu soit dans le même sens, soit dans des sens opposés. Il faut dire que quelque invraisemblable que puisse paraître cette idée au premier abord, elle a été réalisée et de plusieurs manières différentes.

Si l'on remarque que les opérations matérielles nécessaires à la production d'un signal au manipulateur et d'un signal au récepteur exigent un temps appréciable, tandis que le passage du courant dans la ligne a une durée excessivement courte, on comprend que, en faisant servir un fil à une seule transmission, on le laisse inutilisé pendant la plus grande partie du temps, alors même que par des dispositions mécaniques on a réduit la durée de ces opérations matérielles autant qu'il est possible.

Imaginons que t soit le temps nécessaire pour produire les signaux matériellement et que $\frac{t}{n}$ soit le temps qui correspond au passage du courant : il est inutile de laisser la ligne en contact avec le récepteur et le manipulateur et il suffirait que pour chaque période de durée t le contact fût établit pendant un temps $\frac{t}{n}$ à la condition

que, grâce à des dispositions spéciales, le contact eût lieu simultanément aux deux extrémités de la ligne. On voit alors que la ligne restera inutile, inoccupée pendant un temps égal à $\frac{(n-1)t}{n}$; on peut profiter de ce temps pour la mettre en contact également pendant $\frac{t}{n}$ avec un autre couple d'appareils, pourvu qu'il y ait aussi simultanéité dans le contact et que ce contact ne s'effectue pas au même instant que celui qui se produit pour le premier couple : le fil sera alors occupé pendant $\frac{}{n}$ mais on conçoit qu'on puisse aller plus loin et que, théoriquement du moins, on puisse mettre le cable en communication successivement avec n couples d'appareils à la condition que le contact ait lieu simultanément pour les deux appareils correspondants, et que ce contact dure exactement $\frac{t}{n}$. Il est clair d'ailleurs que, dans la pratique, on ne pourra pas installer n couples d'appareils et que, pour éviter les erreurs provenant de l'impossibilité d'obtenir des contacts d'une absolue simultanéité et ayant exactement la durée exigée, il faudra rester en dessous de ce chiffre.

C'est là un système de transmission multiple, basé sur la division du temps et dont l'idée première est attribuée par les Américains à G. Farmer, de Boston (1852). On comprend que les conditions mécaniques exigeant un parfait synchronisme de mouvement aux deux extrémités de la ligne sont excessivement difficiles à réaliser; aussi n'est-il pas étonnant si les essais tentés à cette époque ne donnèrent pas de résultats satisfaisants.

Nous indiquerons plus loin un type des transmissions multiples de cette nature; mais nous devons faire remarquer, que pendant le temps affecté à un couple d'appareils, la ligne lui appartient exclusivement, de telle sorte que la transmission pour ce couple peut se faire indifféremment dans un sens ou dans l'autre. Chaque couple d'appareils est indépendant des autres et fonctionne comme s'il avait une ligne à sa seule disposition.

575. — Cette solution mécanique du problème est moins intéressante au point de vue de l'électricité que celles qui utilisent seulement les propriétés et les lois des courants pour envoyer d'une manière réellement *simultanée* deux dépêches dans le même sens ou deux dépêches en sens opposé; on a même pu dépasser ce nombre. Nous allons donner quelques explications sur les principales dispositions qui ont été adoptées : nous nous occuperons d'abord du cas dans lequel les dépêches sont expédiées en sens contraire.

Ainsi qu'on le verra, ce qui différencie en pratique ces systèmes de ceux basés sur la division du temps, c'est que les transmissions sont absolument indépendantes les unes des autres comme rapidité de fonctionnement, tandis que dans ces derniers les émissions de signaux doivent avoir lieu dans des périodes absolument déterminées. C'est là une sujétion qui, dans la pratique, n'a pas d'ailleurs de grands inconvénients.

576. Système duplex. — C'est en 1853 qu'ont été faits les premier essais de Gintl pour obtenir la transmission en duplex, c'est-à-dire la transmission simultanée de deux dépêches en sens opposé; mais c'est seulement après les perfectionnements apportés par Stearn, en Amérique, que cette méthode entra dans la pratique. Il existe deux méthodes principales auxquelles on peut rattacher les diverses combinaisons essayées : la méthode différentielle et la méthode par le pont de Wheatstone.

Dans la méthode différentielle les deux stations A et A_1 (fig. 452)

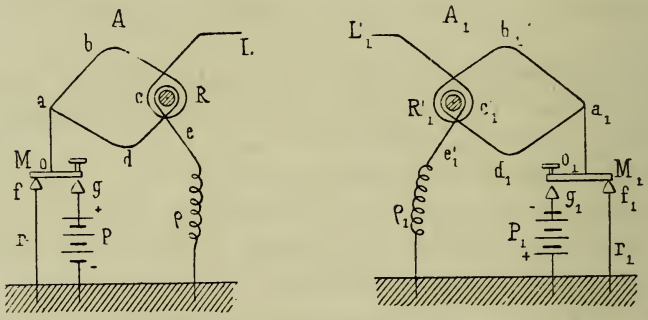


Fig. 452. — Transmission en duplex.

présentent absolument la même disposition, sauf que dans l'une, A, par exemple, la pile P a son pôle — à la terre tandis que dans l'autre A_1, la pile P_1 a son pôle + à la terre. Il suffit donc de décrire une station.

A la position de repos, le manipulateur est sur la touche *f* qui par le fil *r* le fait communiquer à la terre, tandis que de l'axe *o* part un fil *oa;* quand on agit sur le bouton du manipulateur (s'il s'agit d'un Morse), on met le levier en communication avec la pile P qui, d'autre part, est reliée à la terre. Le fil partant du manipulateur *oa* se divise en deux circuits qui s'enroulent en sens contraire sur les électro-aimants du récepteur de la même station : l'un *abc* aboutit à la ligne L qui rejoint l'autre station, l'autre *ade* qui se continue avec

une bobine de résistance ρ reliée à la terre, cette bobine étant choisie de manière à avoir une résistance égale à celle de la ligne elle-même.

Ainsi que nous l'avons dit, l'autre station présente absolument la même disposition.

On reconnaît aisément que chaque récepteur est absolument insensible à l'action des courants émanés du manipulateur de la même station et qu'il obéit toujours lorsqu'un courant est émis par le manipulateur de l'autre station.

Supposons d'abord que le manipulateur M soit seul en action et qu'il vienne s'appuyer sur le contact g, quittant en même temps la touche f. Le courant de la pile P traverse le manipulateur et arrive en o où il se bifurque; d'un côté il suit le chemin $ade\rho$, de l'autre, le chemin abcL.$L_1c_1b_1a_1o_1f_1r_1$; ces deux chemins ayant la même résistance sont parcourus par des courants de même intensité; dès lors le récepteur R restera insensible puisque les deux courants qui le parcourent en sens contraires sont égaux; mais le récepteur R_1 sera traversé par le courant direct émané de A suivant $L_1c_1b_1$ et par le courant dérivé de même sens $a_1d_1e_1$: il entrera donc en action.

Il va sans dire que les choses se passeraient d'une manière tout analogue si c'était la station A_1 qui fît une émission tandis que la station A resterait au repos.

Supposons que les deux stations abaissent leurs manipulateurs en même temps : examinons ce qui se passe alors en A, par exemple. Le courant qui parcourt le circuit P$goade\rho$ a une intensité déterminée par la résistance de ce circuit et par la force électromotrice de la pile; mais l'autre courant correspond au circuit total P$goabc$L...$L_1e_1b_1a_1o_1P_1$ a une intensité plus grande, car le circuit présente à peu près la même résistance et la force électromotrice y est double puisque le circuit comprend deux piles P et P_1 ayant la même orientation; le récepteur fonctionnera donc sous une action dépendant de la différence de ces deux courants. Il n'agissait pas quand le manipulateur M seul était en action; il obéit soit au manipulateur M_1 seul, soit lorsque les deux manipulateurs M et M_1 fonctionnent; tout se passe donc comme s'il était absolument indépendant de M et ne dépendît que de M_1.

577. — Dans la méthode du pont de Wheatstone, on peut employer à la réception un appareil quelconque sans aucune modification dans la construction, tandis que, comme nous l'avons indiqué, dans la méthode différentielle les récepteurs doivent être disposés d'une façon spéciale. D'ailleurs comme précédemment les

deux stations présentent des dispositions absolument identiques.

Soient M le manipulateur (fig. 453), r sa communication avec la terre, P la pile, oa le fil partant de l'axe (en supposant toujours qu'il s'agit d'un appareil Morse; il serait aisé de voir les modifications qui résulteraient de l'emploi d'un autre système); en a le fil se bifurque présentant en ab une résistance ρ' et en ad une résistance ρ''; le fil b communique avec la ligne L et l'autre station d'une part, le fil en d communique avec la terre par l'intermédiaire d'une résistance ρ, d'autre part, tandis que les points b et d sont reliés par un conducteur sur lequel se trouve le récepteur R.

Comme précédemment un récepteur est indifférent (si les conditions sont convenablement choisies) à toute action du manipula-

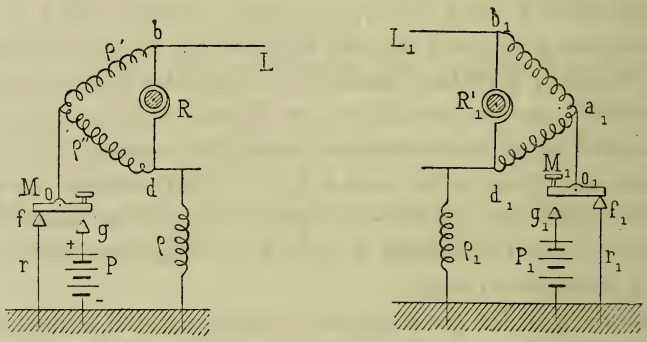


Fig. 453. — Transmission en duplex.

teur de la même station; il entre en action au contraire sous l'action du manipulateur de l'autre station.

Supposons, par exemple, d'abord que le manipulateur M soit seul mis en action; le contact s'établira en g et le courant partant de la pile arrivera en a où il se bifurquera, d'une part en $a\rho''d\rho$, de l'autre en $a'\rho b\mathrm{LL}_1b_1$,... Si les résistances ρ, ρ' et ρ'' ont été convenablement choisies en tenant compte de la résistance de la ligne, on conçoit que les points b et d se trouvent au même potentiel, et que, comme il arrive dans le pont de Wheatstone, la traverse bd et par suite le récepteur R ne soient parcourus par aucun courant : le récepteur R ne fonctionne donc pas.

Voyons maintenant ce qui se passe à l'autre station. Le courant arrive en b_1 et se divise en deux l'un suivant b_1a_1 l'autre suivant b_1d_1; ce dernier n'est pas nul et par suite le récepteur R_1 entre en action.

Donc quand un manipulateur seul fonctionne le récepteur de la même station est insensible, mais le récepteur de l'autre station entre en action.

Les choses se passent différemment si les deux manipulateurs sont abaissés en même temps ; la présence de la pile P_1 qui est alors dans le circuit modifie complètement la répartition du potentiel sur le fil abL $L_1 b_1$ de telle sorte que le point b est à un potentiel différent de d et qu'un courant traverse le récepteur R qui fonctionne alors.

Ainsi dans tous les cas, un récepteur n'entre jamais en action que quand on fait fonctionner le manipulateur de l'autre station : il y a donc indépendance complète entre les transmissions qui peuvent être effectuées de chaque station.

Dans l'une et l'autre méthodes les résistances doivent pouvoir être aisément modifiées, parce que la résistance de la ligne n'est pas invariable et qu'elle change avec toutes les circonstances extérieures.

Lorsque les lignes sont longues, 150 kilomètres environ et surtout si elles comprennent un câble ou une partie souterraine, la transmission présente quelques difficultés provenant de la décharge statique qui se produit lorsque la ligne a été fermée sur la pile ; pour l'empêcher il faut placer autant que possible la résistance artificielle dans les mêmes conditions que la ligne au point de vue de la capacité, comme on l'a fait pour la résistance même. On y arrive en reliant des condensateurs de capacités différentes à cette résistance artificielle.

578. Système diplex. — Il est possible, à l'aide d'ingénieuses combinaisons, d'expédier deux dépêches et même davantage sur le même fil et dans le même sens. Nous nous bornerons à faire comprendre l'idée des méthodes qui ont été employées sans entrer dans le détail des appareils auxquels on donne quelquefois le nom de *système diplex*.

Nous indiquerons le principe du système imaginé par M. Edison. Pour en comprendre l'idée, il est commode d'expliquer d'abord le mode des fonctionnements des récepteurs, ou plutôt des relais qui mettent les récepteurs en action, car dans ces systèmes comme dans beaucoup d'autres il convient de faire fonctionner les récepteurs à l'aide de piles locales dans le circuit desquelles sont intercalés des relais mus par le courant de la ligne.

L'un des relais récepteurs ne fonctionne que sous l'influence de courants d'intensités différentes quel que soit leur sens : c'est un

relais non aimanté réglé au moyen d'un ressort antagoniste, il ne subit pas l'action des courants dont on change le sens, à moins qu'il n'y ait une modification notable dans l'intensité.

L'autre relais récepteur est aimanté, placé entre deux électro-aimants et sans ressort antagoniste ; le contact étant attiré d'un côté y restera quels que soient le nombre et l'intensité des courants ultérieurs s'ils sont de même sens ; il basculera, au contraire, s'il survient un courant inverse, pour rester dans cette nouvelle position dans les mêmes conditions. C'est donc un relais qui ne fonctionnera que sous l'influence des courants alternés.

Pour pouvoir faire fonctionner ces relais à l'aide d'une seule ligne, il faut avoir deux manipulateurs tels que chacun agisse exclusivement sur un des récepteurs ; c'est-à-dire que les mouvements du premier doivent avoir toujours pour effet de faire varier l'intensité du courant quelle que soit la position du deuxième manipulateur, tandis que, au contraire, les mouvements de celui-ci amènent toujours le changement du sens du courant quelle que soit la position du premier manipulateur. Voici le schéma de la disposition adoptée pour satisfaire à ces conditions (fig. 454).

Premier manipulateur. — Nous le supposerons constitué par un conducteur M_1 mobile relié à la terre T et susceptible de se mouvoir ; dans la position I (ou III) il appuie sur le levier B′ qu'il écarte du contact A′, tandis que le levier B touche le contact A ; dans la position II (ou IV), inversement, ce conducteur M_1 appuie sur le levier B qu'il écarte du contact A, tandis que le levier B′ touche le contact A′. Ces deux contacts A et A′ sont reliés directement à la ligne L l'un par A′F, l'autre par ADE.

Deuxième manipulateur. — Nous le supposons constitué par un levier M_2 oscillant de manière à toucher alternativement les contacts C et C′.

Il y a deux piles, dont l'une P′ a une force électromotrice triple de l'autre P : elles sont montées dans le même sens. Le contact C′ communique avec l'un des pôles, le pôle — par exemple de la pile P′ ; le contact C communique au point K situé entre les deux piles.

Enfin le pôle + de la pile P est relié au levier B, tandis que le levier B′ communique avec le manipulateur M_2.

En suivant la marche des courants dans les figures, on reconnaît aisément que, quelle que soit la position de M_2, le déplacement de M_1 change le sens du courant. Si le levier M_2 touche le contact C (I, II), le déplacement de M_1 de la position (1) à la position (2) fait passer le courant de + 1 à — 1 (en prenant pour unité le courant produit par la

pile P) ; si le levier M_2 touche le contact C′ (III, IV), le déplacement de M_1 de la position (1) à la position (2) fait passer le courant de $+4$ à -4.

On voit aussi facilement que quand M_2 passe de la position (3) à la position (4) le courant passe de $+1$ à $+4$ si M_1 (I, III), est dans la position (1) ; quand M_2 passe de la position (1) à la position

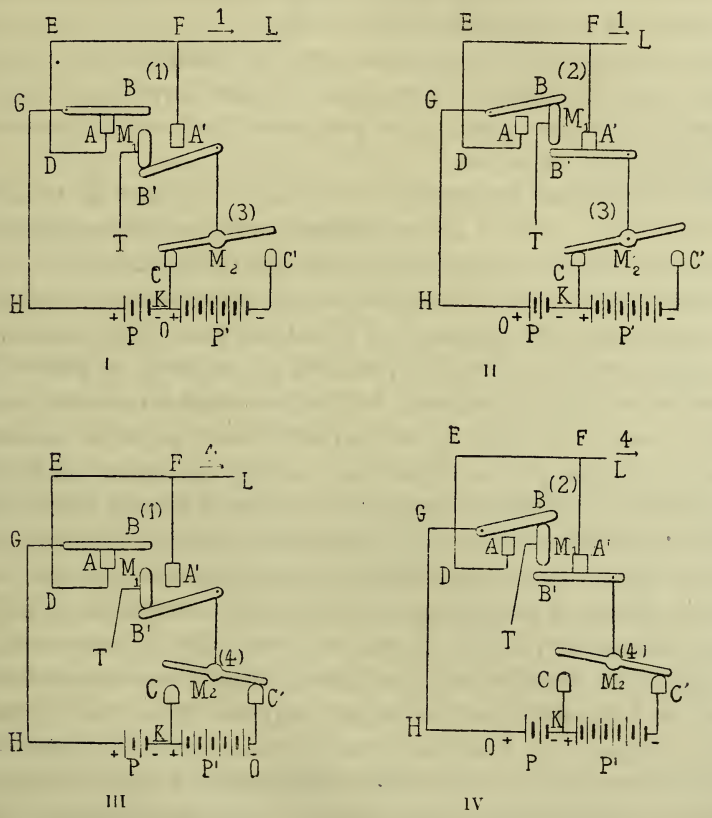


Fig. 454. — Transmission en diplex.

(3), le courant passe de -1 à -4 si M_1 (II, IV) est dans la position (2). Donc, quelle que soit la position de M_1, le déplacement de M_2 fait varier notablement l'intensité du courant.

On comprend alors que, d'après les propriétés des récepteurs, chaque manipulateur agira seulement sur un récepteur quel que soit le déplacement de l'autre manipulateur, le manipulateur M_1 faisant mouvoir seulement le récepteur qui ne fonctionne que sous

l'influence des courants alternatifs, tandis que le manipulateur M_2 agit seulement sur le récepteur qui fonctionne sous l'influence des variations d'intensité de courant. Il y a donc bien indépendance et, par suite, la transmission simultanée peut avoir lieu.

Disons que le mouvement des manipulateurs ne se produit pas directement, mais qu'il est obtenu par le mouvement d'un manipulateur Morse qui agit sur un circuit local faisant fonctionner un mécanisme spécial qui produit le déplacement de pièces jouant le rôle que nous avons attribué à M_1 et à M_2.

On peut combiner ce système avec la transmission en duplex opposé, par le système différentiel ; de telle sorte que l'on a, en somme, un système quadruplex permettant la transmission simultanée de quatre dépêches.

579. Télégraphe harmonique. — Un autre système de transmission simultanée dans le même sens est celui du télégraphe harmonique de Gray dont nous n'exposerons que l'idée générale.

Admettons que, à la station d'arrivée, il y ait une série de diapasons correspondant à des nombres de vibrations assez différents, répondant par exemple aux sons *ut*, *mi*, *sol*, *ut* (octave), et placés chacun devant un électro-aimant, les bobines étant mises en série sur la ligne ; supposons qu'ils soient en vibrations et qu'on envoie dans la ligne un courant qui, au départ, ait traversé également un électro-diapason. Si ce dernier diapason n'est pas d'accord avec un des diapasons récepteurs, ceux-ci s'arrêteront bientôt, le courant produisant des actions intermittentes qui ne coïncident pas avec la période de vibration de ces diapasons ; si l'électro-diapason, au départ, est à l'unisson de l'un des diapasons récepteurs, le mouvement vibratoire de ce dernier seul continuera. Enfin si on envoie dans la ligne les courants ayant au départ traversé deux, trois, quatre, électro-diapasons à l'unisson des diapasons récepteurs, ceux-ci vibreront tous ; si l'un des électro-diapasons s'arrête, le diapason récepteur s'arrêtera seul pour repartir si le premier repart également. En un mot, la mise en mouvement d'un électro-diapason, quelconque au départ, fera vibrer un diapason récepteur et un seul. Affectons donc les diapasons à l'unisson à une transmission et toutes les variations qui se produiront au départ étant reproduites à l'arrivée, il pourra s'établir une correspondance qui sera complètement indépendante des actions qui se manifesteront semblablement pour les autres couples de diapasons.

Théoriquement, on pourrait utiliser les mouvements vibratoires mêmes à la correspondance ; mais ce moyen est sans valeur dans la

pratique. En réalité, le mouvement vibratoire au départ est produit en temps utile par un manipulateur quelconque, une clef de Morse, par exemple, qui fait agir un circuit local traversant un appareil spécial produisant le mouvement de la lame vibrante qui est placée dans ce circuit et qui, au point de vue de la ligne, est le véritable transmetteur.

Il en est de même à l'arrivée et la lame vibrante agit comme relais et peut faire fonctionner un appareil récepteur quelconque.

Nous n'entrerons pas dans le détail des dispositions spéciales qui sont nécessaires dans la pratique pour permettre le fonctionnement de ces diverses pièces, dispositions qui peuvent être variables, d'ailleurs. Nous dirons seulement que l'électro-diapason a été appliqué avec avantage à des appareils variés : il est la base d'un système essayé aux États-Unis, le télégraphe Delany qui, paraît-il, a donné des résultats extrêmement remarquables.

Ajoutons que l'idée de l'emploi des courants interrompus par une lame vibrante pour transmettre simultanément plusieurs dépêches a été signalé par P. Lacour en 1878, la même année que Gray, et même antérieurement par l'abbé Laborde (1860) ; mais ce dernier se serait contenté d'indiquer nettement le principe, nous ne croyons pas qu'il ait cherché à le réaliser pratiquement.

580. Télégraphe Baudot. — Parmi les divers appareils télégraphiques basés sur la division du temps, le télégraphe Baudot est celui qui, jusqu'à présent, au moins en France, a donné les meilleurs résultats : il est intéressant d'ailleurs tant au point de vue de l'emploi ingénieux de l'électricité qu'à celui des dispositions mécaniques qui ont permis de lever les difficultés nombreuses que présentait la réalisation du principe : nous passerons rapidement sur ces dernières, insistant quelque peu sur la partie qui est plus spécialement électrique.

Il importe de se rendre compte d'abord de la manière dont fonctionne l'appareil agissant pour une transmission unique ; nous indiquerons plus tard comment on peut obtenir la transmission simultanée.

Au poste de départ on trouve : 1° un manipulateur à 5 touches ; 2° un distributeur ; 3° un frotteur.

1° Chaque touche du manipulateur (fig. 455) est constituée par une lame de ressort *l* qui, abandonnée à elle-même, vient presser contre un butoir supérieur H que nous désignerons sous le nom de *butoir de repos ;* la pression du doigt sur une touche amène celle-ci au contact de son butoir inférieur B que nous désignerons sous le

nom de *butoir de travail*. Les cinq butoirs de repos sont reliés au pôle — d'une pile, les cinq butoirs de travail au pôle + d'une autre pile, ces deux piles étant mises à la terre, d'autre part.

2° Le distributeur comprend cinq contacts métallique 1, 2, 3, 4, 5, disposés en arc de cercle, communiquant respectivement avec les cinq touches du manipulateur, et un autre contact métallique concentrique C.

3° Le frotteur F est constitué par une pièce métallique montée sur une armature isolante et tournant d'un mouvement uniforme, sous

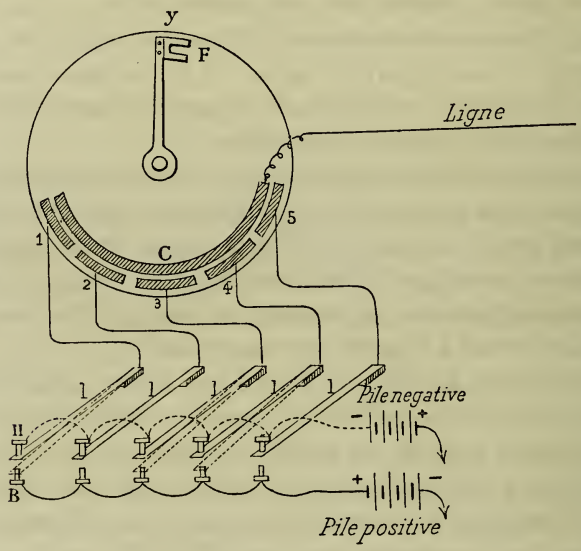


Fig. 455. — Télégraphe Baudot ; transmetteur.

l'influence d'un mouvement d'horlogerie, autour du centre du distributeur.

Au poste d'arrivée, on trouve : 1° un distributeur ; 2° un frotteur, 3° un groupe de cinq électro-aimants récepteurs (fig. 456).

1° Le distributeur et 2° le frotteur sont identiques à ceux que nous venons de décrire. Les contacts continus C et C' des deux distributeurs sont reliés par le fil de ligne ; les deux frotteurs ont des mouvements identiques occupant, au même instant, les mêmes positions sur les distributeurs.

3° Chacun des cinq électro-aimants est polarisé et son armature est disposée de manière à être pressée vers son butoir de gauche ou vers celui de droite suivant que les bobines sont reliées avec un pôle

négatif ou avec un pôle positif. Nous désignerons les butoirs de droite sous le nom de *butoir de repos* et les butoirs de gauche sous celui de *butoir de travail*. Chaque armature est réglée de façon à rester en permanence au contact du butoir sur lequel elle a été pressée par le courant qui vient de traverser les bobines. Ces électro-aimants sont reliés respectivement aux cinq touches du distributeur.

Les frotteurs marchant *identiquement* passeront en même temps, au départ et à l'arrivée, sur les touches correspondantes des distributeurs; toutes les touches étant au repos au départ et chaque armature étant sur le butoir de repos à l'arrivée, le mouvement du frotteur passant au départ sur une touche quelconque enverra sur

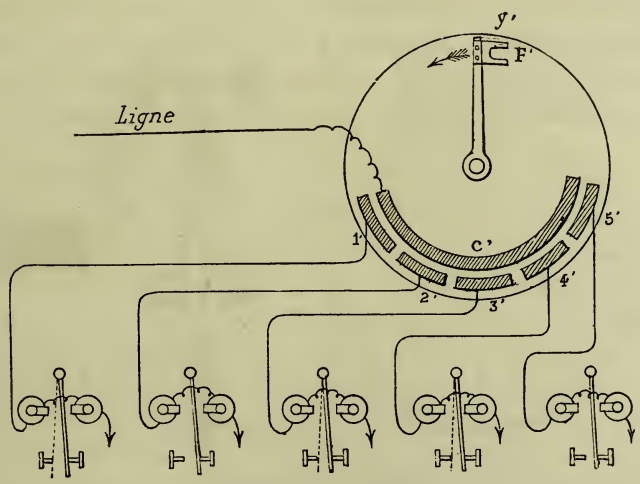


Fig. 456. — Télégraphe Baudot ; récepteur.

la ligne un courant négatif (c'est-à-dire que la ligne sera au départ en contact avec un pôle négatif) et ne fera aucun effet à l'arrivée puisque l'armature de l'électro-aimant correspondant est à la position qui correspond à ce sens du courant.

Mais si l'on a abaissé une touche, le frotteur passant sur le contact correspondant enverra dans la ligne un courant positif; à l'arrivée le frotteur occupe la même position, l'électro-aimant correspondant sera donc traversé par un courant positif, l'armature se déplacera et viendra presser sur son butoir de travail. Il en sera de même pour chaque touche abaissée de telle sorte que, après un tour du frotteur les armatures des électro-aimants du récepteur seront disposées sur les butoirs de repos et les butoirs de travail dans le même ordre

que, au transmetteur, les touches étaient élevées ou abaissées.

On peut donc transmettre pour chaque tour du frotteur une combinaison déterminée par le nombre et l'ordre des touches abaissées ou élevées : il y a trente-deux combinaisons de ce genre; comme à chacune d'elles on peut conventionnellement adopter l'idée d'une lettre ou d'un signe déterminé, on a donc le moyen de transmettre un caractère d'un bout de la ligne à l'autre pour chaque tour des frotteurs.

Il importe de remarquer que l'ensemble des cinq armatures qui reproduit ainsi l'image exacte des cinq touches du manipulateur conserve cette disposition pendant tout le tour du frotteur, même

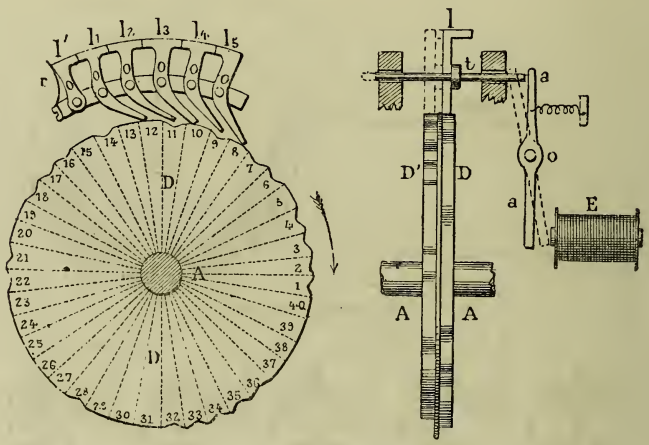


Fig. 457. — Combinateur.

après qu'il a quitté les contacts du distributeur et jusqu'au tour suivant où il se produira un changement seulement si on a modifié la disposition des touches qui existait précédemment.

581. — C'est dans cette reproduction d'une disposition de touches déplacées ou non que réside le principal travail du courant, le travail télégraphique proprement dit; mais M. Baudot s'est proposé de traduire à l'arrivée le signe conventionnel correspondant à cette disposition en une lettre effectivement imprimée; il y est arrivé par des dispositions remarquables que nous signalerons rapidement et dont la principale est l'organe qu'il appelle *combinateur*.

Chaque armature des électro-aimants du récepteur (ou plutôt d'autres électro-aimants pour lesquels ceux-ci servent de relais) est reliée à un *chercheur*, pièce formant levier *l* (fig. 457) et pouvant

glisser sur son axe de rotation ; cette pièce se déplace donc par glissement dans un sens ou dans l'autre suivant que l'armature correspondante est à la position de repos ou à la position de travail. Il existe ainsi cinq leviers l_1, l_2 ..., l_5, qui sont en contact par une extrémité élargie, de telle sorte que le contact ne cesse pas malgré les déplacements qui se produisent par glissement; le premier levier l', est également en contact avec une pièce mobile qui est soumise à l'action d'un ressort r qui aurait pour effet si les leviers étaient libres de les faire tous basculer; mais en général ce mouvement de bascule ne peut pas se produire, parce que par leurs extrémités inférieures les chercheurs touchent le bord d'un disque mobile D; ce bord est découpé, présentant des enfoncements sur certaines parties; sur un point la découpure est suffisante pour que les queues des cinq chercheurs y pénètrent à la fois, quand cette partie passera sous les leviers, ceux-ci basculeront tous ensemble; partout ailleurs les parties découpées présentent une moindre longueur, de telle sorte qu'il y a au moins un levier dont la queue porte sur une saillie, ce qui suffit pour empêcher tout mouvement de bascule, car les leviers sont rendus solidaires, dans une certaine mesure, par leur contact supérieur. Mais, à côté de ce disque il s'en trouve un autre analogue D', qui présente des parties pleines aux points où le premier présente des découpures; les chercheurs se trouvent au-dessus de ce second disque quand les électro-aimants sont à la position de travail, comme ils sont au-dessus du premier quand les électro-aimants sont à la position de repos.

Supposons une combinaison quelconque transmise correspondant à une distribution déterminée qui amènera certains chercheurs sur le second disque et maintiendra les autres sur le premier disque; quand les disques tourneront, en général, le système des leviers ne basculera pas, parce qu'il y aura un ou plusieurs leviers qui se trouveront au-dessus d'une partie pleine; mais une analyse complète montre qu'il y aura une position et une seule pour laquelle les cinq leviers seront tous en face d'une partie découpée; pour cette position le système basculera, pour revenir rapidement d'ailleurs à sa position primitive car, par la rotation, des parties pleines auront succédé au moins sur l'un des disques à la partie découpée.

Quelle que soit donc la combinaison transmise et reproduite par le récepteur, il y aura pour un tour complet de ce disque un mouvement de bascule qui se produira pour une position du disque déterminée par la forme même de la combinaison.

Concevons alors qu'une roue R (fig. 458) portant en relief sur sa

circonférence trente-deux caractères différents soit reliée au combinateur et tourne en même temps que lui. Près de cette roue se trouve la roulette I sur laquelle passe une bande de papier *pp* : la roulette est portée sur une tige mobile, mais elle est maintenue écartée de la roue par l'action du ressort *r*. La tige *t* est reliée au système des chercheurs par l'intermédiaire du bras L; lorsque les leviers exécuteront leur mouvement de bascule, le papier se trouvera donc appliqué contre la roue et le caractère qui se trouve en ce point sera imprimé. Comme chaque combinaison des leviers se produit *une* fois seulement pour le tour de la circonférence, le caractère correspondant à chacune de ces combinaisons devra figurer une fois aussi sur le disque.

Le combinateur tourne avec la même vitesse que les frotteurs du

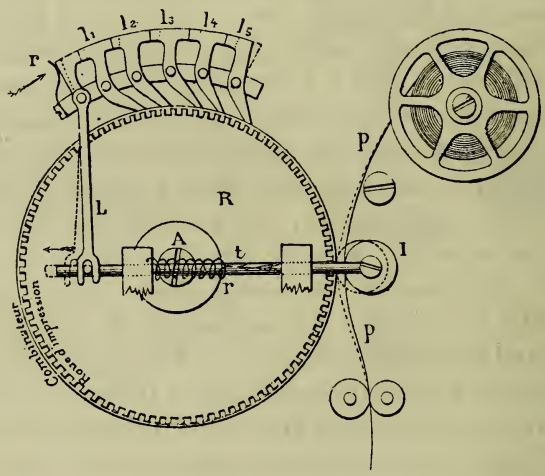


Fig. 458. — Imprimeur.

manipulateur et du récepteur; si donc à chaque tour on abaisse certaines touches du manipulateur pour produire une combinaison déterminée, cette combinaison sera reproduite au récepteur et une lettre sera imprimée; il en sera ainsi pour chaque tour et l'on pourra transmettre des séries de lettres, des mots, des phrases.

Il est très important de remarquer que tout le travail du combinateur et de l'impression est indépendant de celui de la transmission : celui-ci est terminé lorsque le frotteur a quitté la dernière touche du distributeur; les électro-aimants ont pris la position qu'ils doivent avoir et la conserveront pendant tout le tour et c'est pendant ce temps que ce fait le travail du combinateur.

Nous verrons la conséquence de cette remarque.

583. — Il est clair que la condition essentielle du fonctionnement de ce système c'est le synchronisme absolu du mouvement des frotteurs aux deux stations. On ne peut espérer obtenir ce synchronisme par de simples moyens mécaniques, la moindre différence sur un tour irait en s'accumulant avec le nombre des tours et rendrait bientôt la marche des appareils absolument fautive : aussi faut-il, comme dans l'appareil Hughes, régler constamment les mouvements et corriger à chaque tour les erreurs quelque petites qu'elles soient; c'est le courant même qui est chargé de ce soin : la disposition adoptée par M. Baudot, différente de celle de M. Hughes, est ingénieuse et satisfaisante; il nous paraît inutile de la décrire, puisque nous ne donnons que le principe de l'appareil.

Disons que le télégraphe Baudot à installation simple, que nous venons de décrire sommairement, se prête à une installation en duplex en faisant usage de la méthode différentielle.

584. — La préparation matérielle du signal au manipulateur exige un certain temps de même que, dans le récepteur, les opérations qui amènent à l'impression, tandis que le passage sur le fil de ligne des courants nécessaires à la formation des signes est beaucoup plus court. On conçoit donc qu'il soit possible d'appliquer à cet appareil la méthode permettant la transmission multiple par division du temps : c'est ce qui a été réalisé et cet appareil est construit pour des transmissions quadruples et pour des transmissions sextuples.

Prenons par exemple le cas de la transmission quadruple. L'appareil comprend à chaque bureau, arrivée et départ, quatre postes complets composés chacun d'un manipulateur et d'un récepteur; il y a un distributeur unique sur lequel on a disposé quatre systèmes de contacts analogues à celui que nous avons signalé; chaque système correspond à un des postes; les frotteurs sont disposés comme précédemment se mouvant dans les deux bureaux d'une façon identique. Supposons qu'il fasse un tour en 1 seconde (en réalité il se meut plus rapidement et fait 2 ou 3 tours par seconde) et examinons ce qui se passera lorsque les 4 opérateurs au départ auront abaissé certaines touches de manière à former chacun un signal. Pendant le premier quart de tour le frotteur passe sur la partie du distributeur correspondant au premier appareil et fait arriver à la ligne les courants correspondant au signal formé ; presque instantanément ces courants arrivent au récepteur, agissent sur les électro-aimants qui font mouvoir les chercheurs, mais la lettre ne

s'imprimera que quand ceux-ci trouveront la situation convenable sur le combinateur ; cette action des chercheurs est indépendante des courants dont l'action est terminée quand les électro-aimants ont agi; il ne se produira aucune modification tant que le frotteur ne repassera pas sur la partie correspondante du distributeur, c'est-à-dire pas avant un tour complet; c'est pendant ce temps que s'effectuera le travail de la combination et de l'impression.

Pendant le deuxième quart de tour, le frotteur passera sur les contacts qui communiquent avec le second appareil et établira les courants correspondant au signal formé lesquels arriveront au deuxième récepteur où se préparera de même le travail qui sera continué et terminé pendant le reste du tour.

Les choses se passeront de même pour les autres appareils : il est inutile d'insister.

On comprend qu'il n'est pas nécessaire que les signaux soient préparés en même temps dans les quatre manipulateurs et que, pour chacun d'eux, il suffit que les touches soient abaissées à l'instant qui précède celui où le frotteur va pénétrer sur la partie correspondante du distributeur. Des marteaux frappeurs mus par des électro-aimants sous l'influence de l'appareil même et placés à côté de chaque manipulateur font connaître à l'employé le moment où il doit abaisser les touches.

L'appareil Baudot simple peut expédier 165 lettres par minute; l'appareil multiple peut expédier le même nombre par chaque appareil simple qui en fait partie. Les résultats sont absolument satisfaisants au point de vue pratique.

585. Télégraphe autographique de Meyer. — Quel que soit le soin apporté à la transmission des dépêches télégraphiques, il se produit quelquefois des erreurs, erreurs dont les conséquences peuvent être graves; de plus, des fraudes peuvent également se présenter, par une fausse signature, par exemple. Ces raisons qu'il est inutile de développer suffiraient pour faire comprendre l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir reproduire télégraphiquement un écrit donné, un dessin : quelque compliqué que paraisse le problème et qu'il soit effectivement, il a reçu plusieurs solutions pratiques. Le premier modèle paraît avoir été construit par M. Backwell (1851); l'appareil de M. Caselli a donné ensuite de bons résultats, ainsi que quelques autres : le défaut général de ces appareils est le prix assez élevé de la dépêche et c'est pour cette raison que la télégraphie autographique a été abandonnée en France. Nous croyons cependant devoir en donner un exemple et nous décrirons l'appareil de M. Meyer.

Dans cet appareil comme dans la plupart des autres du même genre, la reproduction est obtenue, non pas identiquement, mais à l'aide de hachures parallèles, rapprochées et régulièrement espacées qui couvrent la figure à reproduire et qui, interrompues conformément aux traits de cette figure, sont reproduites avec leurs interruptions ce qui donne un fac-simile très suffisant. Dans l'appareil Meyer les hachures à la réception sont obtenues à l'aide d'encre d'impression, ce qui est un progrès réel sur les télégraphes antérieurs où, en général au moins, ces hachures étaient fournies par une action électro-chimique et n'étaient jamais absolument nettes.

Le télégraphe Meyer comprend un rouage d'horlogerie puissant régularisé par un pendule conique et mettant en mouvement d'une part le transmetteur et d'autre part le récepteur. Dans les appareils qui sont reliés pour la transmission, il doit y avoir synchronisme

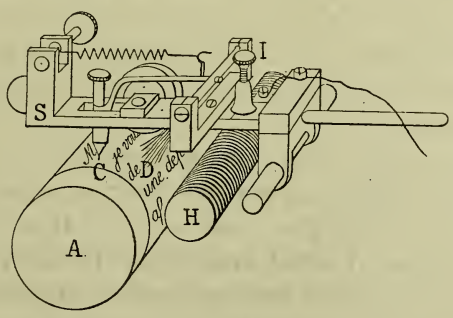


Fig. 459. — Télégraphe autographique Meyer; transmetteur.

aussi parfait que possible des mouvements de rotation; on vérifie qu'il en est ainsi avant la transmission d'une dépêche et si cette condition n'est pas réalisée on agit sur le pendule conique de manière à l'obtenir.

Étudions maintenant successivement le transmetteur et le récepteur.

Le transmetteur (fig. 459) comprend un cylindre expéditeur A, en matière isolante, qui tourne régulièrement (75 tours par minute environ) et sur lequel on enroule la dépêche qui a été écrite avec une encre isolante sur une feuille métallique; ce cylindre peut-être séparé du rouage et n'être mis en mouvement qu'au moment opportun. Parallèlement à ce cylindre, se trouve une vis H qui tourne également sous l'influence du rouage d'horlogerie : sur cette vis repose un écrou qui est lié à un chariot S qui ne peut que glisser sans tourner

et qui, sous l'influence du mouvement de la vis est déplacé parallèlement à l'axe du cylindre, avançant à chaque tour d'une quantité égale au pas de la vis, soit 1/4 de millimètre.

Ce chariot porte un balai métallique D et une pointe également métallique C, isolés l'un et l'autre, qui appuient constamment sur la surface du cylindre. Le balai D est relié au pôle positif de la pile et à la ligne, et la pointe C est reliée à la terre.

La pointe décrit en somme sur la dépêche une hélice à traits serrés, le pas étant seulement de 1/4 de millimètre, hélice qui rencontre tantôt la surface métallique de la dépêche et tantôt les traits isolants.

Lorsque la pointe touche une partie métallique de la dépêche, il s'établit un court circuit, la presque totalité du courant passe de D en C et à la terre par la surface du cylindre, une très faible dérivation passe dans la ligne. Mais lorsque la pointe C rencontre un trait de la dépêche, partie isolante, le circuit est interrompu en ce point et le courant tout entier passe dans la ligne; cette émission de courant dans la ligne a une durée égale à celle du passage du trait isolant sous la pointe.

586. — A la réception, le courant n'agit pas directement sur le mécanisme imprimeur, mais sur un relais; ce relais fonctionne par répulsion comme celui que nous avons indiqué dans l'appareil Hughes et sur lequel il serait sans utilité d'insister. Ce relais agit par inversion sur le circuit local qui contient la pile et le récepteur, c'est-à-dire qu'il arrête le courant local quand il est traversé par le courant de ligne et qu'il rétablit le courant local lorsque le courant de ligne est interrompu.

Le récepteur comprend un cylindre B (fig. 460) tournant à la même vitesse que le cylindre expéditeur; ce cylindre a une longueur égale au développement de la section droite de l'autre; il présente à sa surface une nervure saillante constituant exactement une spire d'hélice. Cette hélice touche constamment un rouleau J imbibé d'encre oléique et son arête entraîne en chaque point une petite quantité de cette encre.

En avant et un peu en dessous de ce cylindre se trouve un châssis métallique qui peut exécuter de faibles mouvements de bascule autour d'un axe parallèle au cylindre. Ce mouvement est déterminé par un électro-aimant E fixé sous le chassis et traversé par le courant de la pile locale; les extrémités de son noyau s'appliquent sur les pôles d'un aimant situé au-dessous, le châssis est alors incliné de telle façon qu'une feuille de papier qui le recouvre vient, de l'autre

côté presser contre l'hélice saillante. Quand passe le courant de la pile locale, les pôles que prend l'électro-aimant sont de même nom que ceux de l'aimant, il y a répulsion; le châssis bascule et la feuille de papier cesse de toucher la nervure.

On voit que tant que le courant local ne passera pas, il y aura contact du papier et de l'hélice qui laissera une trace noire parallèle au cylindre et d'autant plus longue que le contact aura duré plus longtemps. Lorsque le courant de la pile locale cesse, le contact cesse ainsi que la production du trait noir.

Si nous ajoutons que le papier qui recouvre le châssis avance régulièrement de 1/4 de millimètre pendant le temps que le cylindre

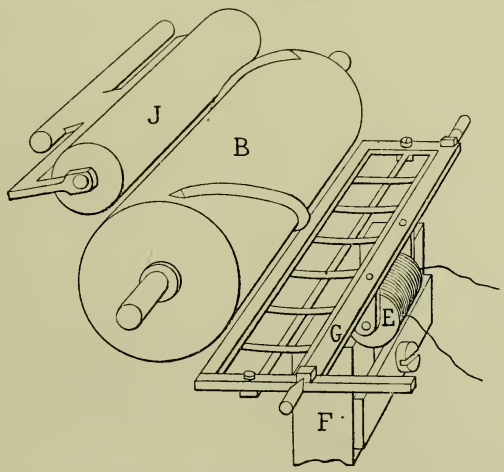


Fig. 460. — Télégraphe autographique Meyer; récepteur.

exécute une révolution, on peut comprendre le mode de fonctionnement de l'appareil :

Tant que, au transmetteur, la pointe rencontre la partie métallique, la ligne est parcourue par un courant négligeable, le relais n'agit pas, le courant de la pile locale passe dans l'électro-aimant, le châssis bascule, le papier s'écarte de la nervure en hélice et rien n'y est tracé.

Lorsque, au transmetteur, la pointe rencontre un trait isolant, le courant entier passe dans la ligne, le relais entre en action, le courant de la pile locale est arrêté, le châssis bascule, le papier s'appuie sur l'hélice saillante, un trait se forme et cette action se continue tant que, au départ, la pointe reste sur la partie isolante. On aura donc une hachure noire dont la longueur sera précisément

égale à l'étendue du trait qui a été parcouru par la pointe. Il en sera de même pour les différents traits qui seraient rencontrés par la pointe dans une même spire d'abord, puis successivement dans les spires suivantes. Comme le déplacement du papier sur le châssis est égal au pas de ces spires, on voit que l'on reproduira ainsi par hachures les caractères, lignes, dessins qui figureront sur la dépêche au départ.

Pour régler le synchronisme on transmet d'abord une droite tracée sur le transmetteur parallèlement à ses génératrices et l'on doit obtenir au récepteur une série de points rapprochés et disposés suivant une droite parallèle aux bords du papier. S'il n'en est pas ainsi, si la droite est inclinée, il n'y a pas synchronisme et le sens de l'inclinaison montre dans quel sens il faut modifier la longueur du pendule régulateur.

587. Télégraphie par cables sous-marins. — La transmission dans les câbles sous-marins est loin de se produire aussi simplement que dans les fils aériens et les phénomènes qui prennent alors naissance compliquent les conditions de la transmission.

L'expérience montre d'abord que la transmission est beaucoup moins rapide dans un semblable câble que dans un conducteur aérien qui présenterait la même résistance. La cause de cette différence est dans les phénomènes de condensation statique qui se manifestent. Un câble sous-marin est, en effet, un véritable condensateur : le fil conducteur constituant une armature, le collecteur, et l'eau de la mer l'autre armature, le condensateur (85) tandis que les enveloppes de gutta-percha et de matières isolantes jouent le même rôle que la lame de verre des condensateurs classiques. La surface du fil conducteur est faible, il est vrai, par mètre courant, mais elle atteint une valeur notable pour ces câbles dont la longueur se compte par centaines ou par milliers de kilomètres. On a évalué d'ailleurs la capacité de ces câbles et l'on sait par exemple que celle du câble transatlantique de Valentia à Greitsal (1882), dont la longueur est de 1650 kilomètres environ a une capacité de près de 300 microfarads.

Le condensateur formé par le câble se charge au fur et à mesure que le courant progresse et c'est cette charge qui est fournie par la pile dont le débit n'est pas instantané qui est la cause du retard observé.

Mais ce phénomène n'est pas le seul qu'il y ait à signaler : supposons que le contact étant établi entre la pile et le câble on observe le passage du courant à l'aide de galvanomètres placés aux deux

extrémités; avant le moment où le courant doit parvenir à l'extrémité opposée, supprimons, au départ, la communication avec la pile, et mettons le fil à la terre : le courant qui était émis dans le fil continuera à progresser et le galvanomètre de la station d'arrivée le signalera; mais en même temps, le galvanomètre de la station de départ révèlera l'existence d'un courant inverse, de telle sorte que les deux moitiés du fil sont parcourues au même instant par des courants opposés. Le courant inverse provient de la décharge du condensateur.

Ce fait et les suivants ne sont pas aisés à observer directement; mais on peut les mettre en évidence, comme l'a fait Varley en établissant des lignes de grande résistance communiquant avec des condensateurs convenablement disposés. Les résultats fournis par les câbles sous-marins ont d'ailleurs été toujours en concordance avec ceux qu'avaient indiqués ces expériences schématiques.

Si, à la station de départ, on rompt la communication avec la pile, sans mettre le fil à la terre et que, très rapidement on rétablisse la communication avant que, à l'arrivée le courant soit arrivé, on verra le galvanomètre à l'arrivée dévier d'abord puis revenir au zéro et dévier de nouveau dans le même sens. Il y aura donc eu dans le fil deux ondes électriques qui se seront succédé à un certain intervalle de temps et seront parvenues successivement à l'extrémité du fil. Un phénomène du même genre doit se produire dans un fil quelconque, mais les actions se suivent avec une extrême rapidité et ne peuvent être, en général, mises en évidence par l'appareil récepteur : ces actions sont distinctes, au contraire, dans le cas des câbles sous-marins à cause du ralentissement qui se manifeste par suite de la condensation.

588. — Le phénomène est plus complexe, si on établit successivement des contacts avec les pôles contraires d'une pile en mettant le fil à la terre après chaque contact. Des ondes électriques inverses parcourent le fil et arrivent successivement à l'extrémité opposée du fil où le galvanomètre récepteur les met en évidence; mais, à l'extrémité du départ, il se produit à chaque contact une superposition du courant résultant de ce contact avec le courant de décharge provenant de la mise à la terre et qui est de même sens.

Ce sont ces actions diverses qui amènent, on le conçoit, une gêne réelle dans la transmission par les câbles sous-marins; on ne peut employer les systèmes qui fonctionnent par l'émission de courants de même sens successifs et de durées égales ou inégales, à cause de la charge constante qui en résulterait; on a substitué un

système basé sur l'action des courants inverses : le récepteur étant un galvanomètre, au lieu de représenter le trait et le point du système Morse par des déviations longues et brèves, on est convenu de les remplacer par des déviations à droite et à gauche, ee qui entraîne le passage dans le câble de courants tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, et empêche la charge du condensateur de s'accroître.

589. — En réalité on ne prend pas pour signaux les déviations du galvanomètre à droite et à gauche de la position d'équilibre, ce qui exigerait que, à chaque signal, le câble fût déchargé et le galvanomètre cessât d'être dévié : mais à chaque instant on évalue la déviation par rapport à la situation actuelle. Le galvanomètre étant dévié, si l'aiguille s'écarte davantage de la position d'équilibre, ce résultat est l'action d'un courant analogue à celui qui avait produit l'effet précédent, il est donc de même sens et a la même signification; si, au contraire, l'aiguille se rapproche du zéro, c'est que le courant a changé de sens, c'est donc l'autre signal qui a été transmis. Grâce à cette remarque, la vitesse de transmission a pu être grandement augmentée.

Donnons quelques détails sur les appareils employés à la transmission sous-marine.

590. — Dans le système le plus simple le récepteur est un galvanomètre à miroir analogue au modèle de sir William Thomson que nous avons décrit (254). Il est placé à un mètre environ de distance d'un écran noir sur lequel est collée une bande blanche horizontale; une fente rectangulaire est pratiquée au-dessous. Derrière l'écran se trouve une source vive de lumière qui, à travers une lentille, envoie par la fente un faisceau sur le miroir; on fait varier l'inclinaison de ce faisceau et la hauteur du galvanomètre jusqu'à ce que le faisceau réfléchi tombe sur la bande de papier où il produit une image lumineuse qui se déplace de côté ou d'autre.

Il n'y a pas de repère sur cette bande, parce que comme nous l'avons dit chaque signal est déterminé par le mouvement de l'image par rapport à la position précédente.

Le manipulateur, qui doit mettre la ligne en contact tantôt avec le pôle + et tantôt avec le pôle — de la pile, est dit *manipulateur inverseur*. Il se compose essentiellement de deux touches à ressort A et B (fig. 461) reliées l'une à la terre, l'autre à la ligne : au repos elles sont relevées et s'appuient contre deux contacts fixés sur une lame de cuivre isolée C D et communiquant à l'un des pôles de la pile, le pôle —, par exemple. Quand on abaisse ces lames elles viennent s'appliquer sur des enclumes E, F reliées ensemble et au pôle +

par une lame métallique. On voit que lorsque les deux touches sont à l'état de repos, relevées, la ligne est à la terre ainsi que le pôle —, tandis que le pôle + est isolé. Si on abaisse la touche A, le pôle — reste à la terre, mais la ligne est reliée au pôle +; si, au contraire, on abaisse la touche B, le pôle + est mis à la terre et la ligne reste reliée au pôle —; il y aura donc des courants inverses qui s'établiront dans la ligne suivant qu'on abaissera l'une ou l'autre des touches; de plus, lorsque, après chaque mouvement, les deux touches seront abandonnées à elles-même, la ligne sera reliée à la terre et se déchargera.

On comprend aisément le mode d'emploi de ce manipulateur pour l'envoi des signaux au récepteur galvanométrique.

591. Curb-sender automatique et siphon-recorder. — Malgré

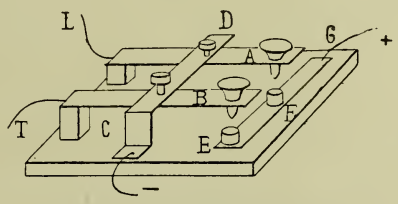


Fig. 461. — Manipulateur inverseur.

l'emploi des courants inverses pour les deux espèces de signaux de la transmission, la ligne ne se décharge pas complètement et à l'arrivée il se produit des difficultés de lecture, surtout après l'émission de plusieurs courants de même sens.

On peut faciliter la lecture et augmenter la vitesse de transmission en *recourbant* (curb-sending) les signaux, ce qui consiste à toujours envoyer dans la ligne successivement deux courants de sens contraire, le second étant de moindre durée que le premier. On peut se représenter graphiquement (fig. 462) le résultat de cette double action en indiquant par une courbe les variations de l'intensité du courant à l'arrivée : le contact étant établi à la station de départ, l'effet ne commence à se produire à l'arrivée qu'après un temps θ dépendant des conditions d'établissement de la ligne. L'intensité qui atteint promptement une valeur constante peut être représentée par la courbe I, d'une manière générale.

Supposons qu'on mette la ligne à la terre après un temps moindre que celui qui est nécessaire pour que la valeur maxima soit atteinte, la courbe d'intensité sera représentée par II et l'on voit que le

courant se prolonge pendant très longtemps; il faudrait au contraire qu'il cessât le plus vite possible pour que le signal que l'on enverra ensuite soit bien distinct.

Imaginons que, après un certain temps, 4θ, par exemple, on fasse passer dans la ligne un courant inverse, mais de durée 3θ; seul il donnerait à l'arrivée des intensités dont la courbe III montre les variations, mais, en réalité son action se superpose à celle représentée par la courbe II et l'intensité observée est caractérisée par la courbe résultante IV qui montre que l'intensité diminue beaucoup plus rapidement, ce qui permet de hâter l'émission du signal suivant.

On pourrait arriver à des résultats analogues mais plus satisfai-

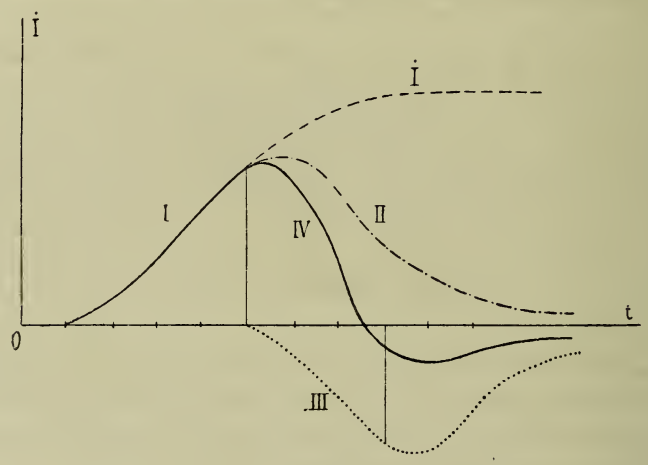


Fig. 462.

sants encore par une troisième émission de courants directs, mais l'expérience montre que deux émissions suffisent dans la pratique.

Pour que les signaux soient lisibles, il faut que les durées des deux courants envoyés successivement aient bien les valeurs que nous avons indiquées; on ne saurait donc arriver à une transmission convenable par une manipulation directe. MM. Thomson et Jenkin ont inventé un appareil destiné à faire automatiquement le travail, appareil qui a reçu le nom de *curb-sender automatique*. Nous ne le décrirons pas et nous nous bornerons à dire qu'il repose sur un principe analogue à celui du transmetteur automatique de Wheatstone emploi d'une bande de papier doublement perforée, sur deux lignes parallèles; les perforations d'un côté correspondent à l'émission

des courants directs, celles de l'autre côté à l'émission des courants inverses. Si donc ces perforations se succèdent dans un ordre et à des distances convenables, la ligne sera parcourue par des courants tels que chaque courant correspondant à un signal sera suivi d'un courant inverse de moindre durée.

592. — La lecture des signaux par l'image lumineuse fournie par le galvanomètre est fatigante et présente d'autre part l'inconvénient que les signaux sont fugitifs, ne laissent aucune trace. Sir William Thomson a inventé un appareil récepteur, le *siphon-recorder* qui donne des signaux écrits. La difficulté principale consistait en ce que la production d'un trait matériel entraîne généralement un frottement, et diminue la sensibilité de l'appareil. On pouvait même craindre que le frottement n'arrêtât complètement les mouvements.

Nous indiquerons seulement le principe de l'appareil.

Une bobine C (fig. 463) très légère (un cadre plutôt) est suspendue

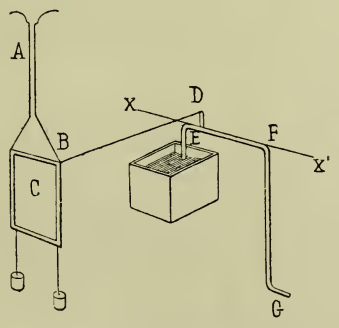


Fig. 463. — Siphon-recorder.

entre les pôles d'un puissant électro-aimant et prend une position d'équilibre parallèle à la ligne des pôles quand le courant ne passe pas; mais elle tend à tourner lorsqu'elle est parcourue par un courant et le sens de la rotation est lié au sens du courant.

Ces mouvements sont communiqués directement à un siphon EFG constitué par un tube de verre très finement étiré à la lampe, et présentant une branche horizontale autour de laquelle il peut tourner; la courte branche plonge dans une encre très fluide qui sortirait par la grande branche si elle n'était retenue par la capillarité.

Cette longue branche recourbée à sa partie inférieure se termine près d'une bande de papier et se déplace perpendiculairement à la longueur de celle-ci quand le siphon oscille sous l'influence des mouvements de la bobine. En même temps le papier est entraîné

uniformément dans le sens de sa longueur par l'action d'un moteur électrique qui, en même temps, fait fonctionner une machine électrique analogue au *replenisher* (313); par l'action de cette machine, l'encre est électrisée fortement; il jaillit alors entre la pointe du siphon et la bande de papier une série continue de très petite étincelles qui entraînent des gouttelettes d'encre, de telle sorte que les mouvements du siphon s'inscrivent sur le papier par un trait ponctué sans qu'il y ait frottement.

La ligne obtenue ainsi présente des sinuosités dans un sens et dans l'autre, sinuosités qui correspondent aux mouvements dans un sens et dans l'autre du siphon et du cadre et par suite qui correspondent aussi à l'émission de courants dans un sens et dans l'autre, de telle sorte que la lecture se fait comme celle des déplacements de l'image lumineuse du miroir.

Ajoutons enfin que la transmission dans les longs câbles est grandement améliorée par l'adjonction à la ligne de condensateurs convenablement choisis; mais nous n'insisterons pas sur la théorie de leur emploi, non plus que sur l'indication de diverses dispositions particulières qui ont été adoptées.

693. Appel d'incendie de la ville de Paris. — Les sonneries et cloches permettent évidemment, à l'aide de conventions spéciales, de transmettre certaines indications d'un point à un autre : dans le but de répondre à des besoins très divers, on a inventé de nombreux appareils susceptibles de faire parvenir rapidement certaines indications déterminées en un point donné. Nous décrirons seulement quelques-uns de ces appareils.

Nous prendrons comme premier exemple les appareils qui sont employés depuis quelque temps à Paris pour appeler les pompiers en cas d'incendie. Les conditions à remplir étaient les suivantes :

Plusieurs boutons d'appel sont montés sur un même circuit qui aboutit au poste d'où doivent venir les secours demandés : il faut que, au poste, non seulement on soit averti par une sonnerie de la demande, mais en outre que l'on puisse reconnaître immédiatement d'où l'appel a été fait. Il faut, d'autre part que, au point où se fait l'appel, on puisse être assuré que le signal a été transmis au poste et que l'on soit averti qu'il a été entendu.

Il existe une pile unique au poste, pile dont un des pôles est mis à la terre tandis que l'autre communique avec l'appareil récepteur; celui-ci est relié à la ligne; chaque appareil transmetteur est, d'autre part, relié à la ligne et à la terre.

Dans le transmetteur (fig. 464), le circuit est interrompu; il est

rétabli lorsque l'on appuie sur un bouton B qui déclenche le système que nous allons décrire sommairement. Le circuit se divise en deux dérivations d'égale résistance ; l'une comprend une sonnerie S qui se mettra en mouvement dès que le courant passera, et cette action prouvera que la ligne est en bon état et que l'appareil récepteur est bien traversé par le courant.

L'autre dérivation comprend les organes qui assurent l'établissement du courant, qui produisent l'envoi d'un nombre limité de courants, nombre qui caractérise précisément l'appareil transmetteur, puis qui maintiennent le passage continu du courant jus-

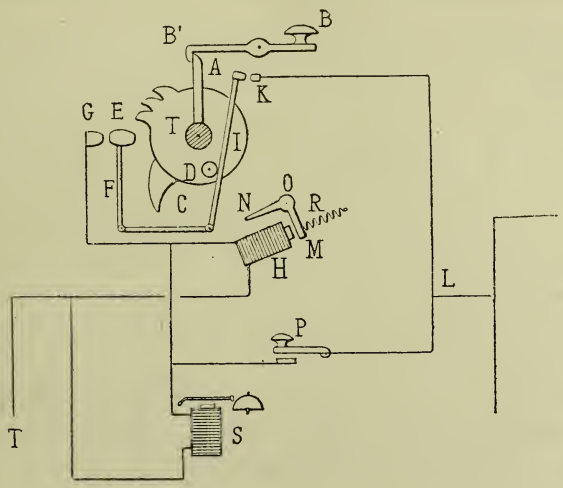


Fig. 464. — Appel d'incendie de la ville de Paris.

qu'au moment où, le circuit étant rompu au poste de réception, l'appareil est ramené à sa position initiale.

Un treuil T mû par un poids porte sur son axe un doigt A qui vient buter contre un arrêt B′ et s'oppose à tout mouvement jusqu'à ce qu'en appuyant sur un bouton B on vienne à le dégager. Sur le même axe se trouvent deux cames C et D et une roue portant un certain nombre de dents. En face de cette roue, se trouve un contact métallique E porté par un ressort F et que les dents poussent contre une pièce métallique G qui est reliée au fil d'un électro-aimant H. La came D agit sur un levier I relié métalliquement au ressort et qui lorsqu'il est déplacé vient fermer le circuit de la ligne L. Enfin devant l'électro-aimant est une palette M constituant avec une tige N un levier coudé mobile autour de O.

Lorsque l'on veut faire un appel, on presse sur le bouton B, le doigt A est dégagé, la roue commence à tourner, les dents viennent rencontrer le contact E et le pressent contre G en même temps que, en K, le circuit se trouve fermé : le courant passera donc autant de fois qu'il y a de dents à la roue régulatrice. En même temps l'électro-aimant H entre en action, le levier MON se déplace et la tige N arrête la came C; le mouvement est donc interrompu et la roue s'arrête à une position telle que la dernière dent reste en contact avec la pièce E ce qui maintient la fermeture du circuit ; le courant continue à passer. Pendant tout ce temps, le courant dérivé passe dans l'électro-aimant S de telle sorte que la sonnerie continue à tinter.

Ce tintement continuera jusqu'à ce que, à la station d'arrivée des signaux, on rompe le circuit. Le courant est alors interrompu ; la sonnerie cesse, ce qui avertit que le signal a été entendu; d'autre part l'électro-aimant H cesse d'agir, le levier MON obéit au ressort R; la tige ON dégage la came C, la roue recommence à tourner et le mouvement se continue jusqu'à ce que le doigt A revienne au contact avec l'arrêt B'; en même temps la came D abandonne la lame I, le contact cesse en K, l'appareil se retrouve donc à la position de repos et prêt à fonctionner à nouveau.

594. — Le récepteur qui se trouve au poste des pompiers comprend une sonnerie et un appareil à cadran qui, à quelques détails près, est analogue au télégraphe à cadran (558). Dans ce télégraphe, une aiguille se déplace sur un cadran divisé avançant d'une case chaque fois que l'appareil est traversé par un courant : ce récepteur est placé entre la ligne et la pile.

Lorsque tous les appareils transmetteurs sont au repos, aucun courant ne passe ; lorsque l'un des transmetteurs entre en action, le courant s'établit, la sonnerie du récepteur fonctionne, et l'aiguille se déplace sur le cadran avançant d'un nombre de cases égal à celui des dents de la roue du transmetteur. Chaque transmetteur présente un nombre différent de dents, de telle sorte que l'arrêt de l'aiguille sur une case indique immédiatement quelle est la station qui a fait le signal.

En appuyant sur un bouton on rompt le circuit et on arrête le courant, ce qui fait cesser la sonnerie au récepteur, arrête en même temps la sonnerie du transmetteur et ramène l'appareil au repos comme nous l'avons dit.

Outre ces dispositions, on a adopté d'autres qui permettent de vérifier à volonté l'état du circuit.

Au transmetteur, une communication est établie directement entre la ligne et la sonnerie S, communication qui, normalement est interrompu en P. Quand on veut essayer la ligne, l'agent pousse un bouton P, qui est hors de portée pour le public, ce qui ferme le circuit, fait fonctionner la sonnerie S et fait marcher la sonnerie et l'aiguille du récepteur. Pour que ce signal ne produise pas une fausse alerte au poste où est le transmetteur, le nombre de dents de la roue régulatrice est de 3 pour la station qui en a le moins ; d'autre part, sur le cadran, les deux premières cases portent un signe spécial et ce n'est qu'à la troisième case que correspondent les indications des stations. Lors donc que l'on fera une épreuve en ap-

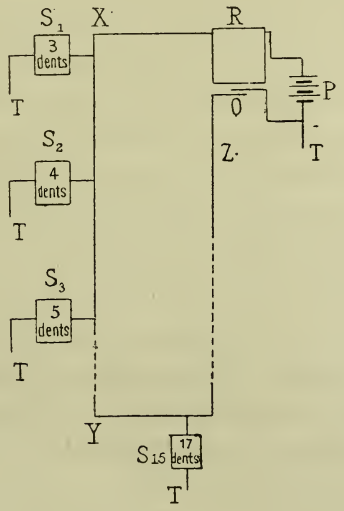


Fig. 465.

puyant sur le bouton P du transmetteur, on n'enverra qu'un courant ce qui ne pourra amener l'aiguille que sur la case réservée ; il en serait de même si, par erreur, on établissait deux contacts successifs.

D'autre part, on peut également vérifier le circuit de la station réceptrice. A cet effet, voici la disposition générale du circuit. La pile P (fig. 465) communique à la terre par un pôle ; le fil qui aboutit à l'autre pôle est relié à l'appareil récepteur R où il y a, au repos, comme nous l'avons dit une série non interrompue de conducteurs, et d'où part la ligne XYZ sur laquelle viennent prendre naissance en divers points les fils qui aboutissent aux divers transmetteurs S_1, S_2,..... S_{15},

le circuit se continue jusqu'à revenir en Z à la station de départ et se relier au fil de la pile; mais il y a en Q une interruption, de telle sorte que, au repos, le courant ne passe pas. Mais si on appuie sur un bouton qui établit en Q la fermeture du circuit, le courant passe, et l'appareil récepteur fonctionne, la sonnerie tinte et l'aiguille avance d'une case. Si ces effets ne se produisent pas, c'est que la ligne présente quelque part un défaut, une interruption.

Nous ne nous arrêtons pas aux détails purement mécaniques concernant le remontage des poids qui font mouvoir la roue régulatrice des transmetteurs et l'aiguille du récepteur, non plus qu'à celui qui permet de ramener au point de départ cette aiguille. Disons d'ailleurs que ce dernier est analogue à la remise à la + du télégraphe à cadran.

595. Télégraphes de quartier; avertisseurs. — Des appareils basés sur un principe analogue à celui que nous venons de décrire ont été proposés et employés pour faire parvenir en un point déterminé des signaux limités en nombre ayant une signification prévue à l'avance. C'est ainsi qu'on peut les employer pour transmettre d'un poste à un autre, d'une gare à une autre sur une ligne de chemin de fer, des dépêches se rapportant aux circonstances qui peuvent se présenter le plus souvent dans l'exploitation. C'est ainsi encore qu'on a proposé des dispositions de ce genre comme télégraphes de quartiers : des appareils sont disposés de distance en distance sur la voie publique et sont reliés au poste de police le plus voisins: ils permettent de transmettre des signaux faisant connaître la nature d'un accident qui s'est produit, de manière à ce que l'on puisse envoyer les secours convenables le plus tôt possible. Il est aisé de concevoir que des communications restreintes en nombre peuvent être utilisées dans un très grand nombre de cas.

Sans vouloir décrire des modèles particuliers qui ont été construits, nous ferons remarquer que le principe général de l'appareil précédent peut-être utilisé en le modifiant un peu; la question est plus complexe puisque le récepteur doit, dans ce cas, enregistrer deux signaux caractéristiques différents, le premier indiquant la station qui fait un appel et le second faisant connaître la nature même de la communication. Il suffit évidemment de disposer l'appareil transmetteur de la façon générale suivante :

Après l'appel fait par la sonnerie et la réponse que l'appel a été entendu, un déclenchement fait marcher une roue dentée partiellement; à chaque dent correspond une émission de courant qui, comme dans l'appareil précédent, par exemple, fait marcher une

aiguille sur un cadran divisé, le nombre d'émission de courants et par conséquent le nombre de cases dont avance l'aiguille du réceptions fait connaître le numéro de la station.

Le transmetteur présente un cadran divisé portant des indications déterminées sur lequel on déplace une manette qui, par l'intermédiaire d'une roue dentée produit un nombre d'émissions de courants correspondant à l'avancement de la manette. Au récepteur, l'aiguille se meut de la même façon sur le cadran qui porte les mêmes indications (comme dans le télégraphe à cadran) et s'arrête sur la case où la manette du transmetteur a été fixée.

En Amérique, où un système de ce genre est appliqué dans plusieurs villes, le récepteur est analogue, non à un télégraphe à cadran, mais à un récepteur Morse; le premier signal fait connaître le numéro de la station d'après le nombre de traits inscrits; puis, après un espace, de nouveau traits correspondent au deuxième signal et leur nombre a une signification déterminée d'avance.

596. Appareils pour l'exploitation des chemins de fer. Block-système. — La rapidité de transmission de l'électricité a été utilisée pour obtenir la réalisation d'un grand nombre de conditions propres à assurer la sécurité dans l'exploitation des voies ferrées : des appareils très variés répondant à des indications diverses ont été imaginés et plusieurs sont d'un usage courant. Nous en décrirons un avec quelques détails, l'appareil Regnault, qui permet la production des signaux qu'exige l'application du *block-système.*

On sait que, dans ce système, la ligne est divisée en diverses sections aux points de séparation desquelles sont des postes et des signaux; soit une section et soient A et B les postes extrêmes. Lorsqu'un train est passé devant A se dirigeant vers B, le passage d'un autre train dans la même direction doit être interdit absolument tant que le poste A n'est pas averti que le train précédent a dépassé la station B et qu'il est entré dans la section suivante; on évite de cette manière certainement les rencontres.

Ajoutons que normalement, la voie doit être fermée à chaque station, c'est-à-dire qu'il doit s'y trouver un signal qui commande l'arrêt. Un poste ne doit ouvrir la voie, en effaçant le signal, que lorsqu'il est prévenu qu'un train a pénétré dans la section précédente et qu'aucun train n'est dans la section suivante :

Voici donc, en les résumant aux points essentiels, les conditions qui devront être réalisées.

Le poste A devra avertir le poste B qu'un train pénètre dans la section A B et, comme garantie, il devra être informé que le poste B a

bien reçu la communication ; il faut d'ailleurs que ces indications soient fournies par des signes matériels subsistant jusqu'au moment où ils doivent être remplacés par d'autres. Le poste B lorsque le train annoncé sera arrivé devra d'une part prévenir le poste suivant, et d'autre part annoncer à A que le train est arrivé et que la section cesse d'être bloquée.

L'appareil Regnault donne ces indications à l'aide d'un tableau sur lequel se meuvent deux aiguilles (pour chaque voie) ; l'une nommée *aiguille indicatrice* annonce au poste l'arrivée d'un train qui pénètre dans la section précédente, l'autre *aiguille réceptrice* indique que le signal envoyé par le poste a bien été reçu par le poste suivant. Ces aiguilles sont verticales lorsque l'appareil est au repos, la mise en action du signal se manifeste par une inclinaison notable.

L'appareil comprend deux transmetteurs qui consiste simple-

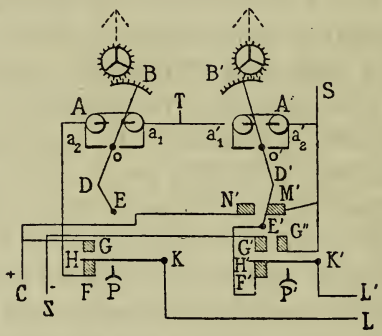


Fig. 466. — Appareil Regnault.

ment en boutons que l'on pousse : l'un appelé *bouton de départ* est destiné à prévenir la station suivante de l'entrée d'un train dans la section ; l'autre, *bouton d'arrivée*, efface tant à la station même qu'à la station précédente le signal qui indiquait que la voie était bloquée, le passage étant rendu libre par l'entrée du train dans la section suivante.

Ajoutons que, pour plus de sûreté, un poste ne peut ramener à la position du repos ni l'aiguille indicatrice du poste suivant lorsqu'il l'a déplacée, ni sa propre aiguille réceptrice qui a été inclinée par le mouvement même de l'autre aiguille indicatrice : le retour au repos ne peut être produit que par la station suivante.

597. — L'appareil Regnault réduit à ses éléments essentiels com-

prend deux parties distinctes : l'une correspondant à l'aiguille réceptrice, l'autre à l'aiguille indicatrice. La pièce essentielle de chacune de ces parties est analogue au relais polarisée Siemens et comprend par conséquent un électro-aimant A (fig. 466) à armature aimantée et une palette en fer doux DOB mobile autour du point O et aimantée parce qu'elle repose en ce point sur un pôle de l'aimant. Comme nous l'avons dit, il en résulte que la palette appliquée sur une des bobines y reste jusqu'à ce qu'un courant de sens convenable change l'aimantation du noyau de cette bobine en renforçant l'aimantation de l'autre, ce qui provoque le déplacement de la palette. A l'extrémité libre B se trouve un secteur denté qui engrène avec un pignon ; sur l'axe de ce pignon est montée une aiguille qui est verticale ou s'incline suivant que la palette s'applique contre le pôle a_1 ou contre le pôle a_2.

La palette se prolonge de l'autre côté de l'axe de rotation O jusqu'en D où elle s'articule avec une pièce métallique DE mobile

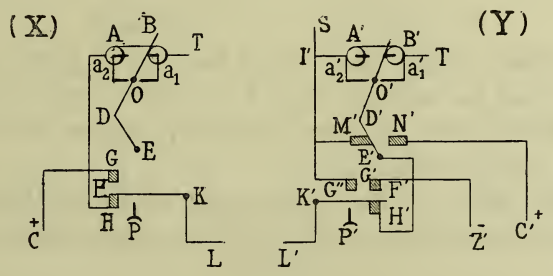


Fig. 467.

autour de E et susceptible, par conséquent de s'incliner dans un sens ou dans l'autre. Dans ses positions extrêmes cette pièce vient buter contre des parties métalliques et sert à établir des communications. (Dans le modèle que nous décrivons, la pièce D'E' sert seulement à cet usage et la pièce DE n'est pas utilisée ; mais celle-ci sert dans d'autres modèles et même on emploie également une autre pièce analogue à D'E' et mue par le mouvement de la même palette.)

On a en KH et K'H' deux ressorts mobiles autour des points K et K' et communiquant avec les deux fils de ligne L et L' qui relient le poste considéré au suivant : au repos ces ressorts appuient sur les contacts métalliques F et F' ; lorsqu'ils sont déplacés par l'action des poussoirs, ils s'appliquent contre les contacts métalliques G et G'G''.

Ces diverses parties sont reliées entre elles comme l'indique la

figure 466 dans laquelle C représente le pôle d'une pile, Z le pôle d'une autre pile, ces piles étant mises à la terre par les pôles opposés : S représente une sonnerie et T indique une communication à la terre.

Pour nous rendre compte du fonctionnement de cet appareil, considérons deux postes consécutifs, X et Y et supposons qu'un train se meuve de X vers Y. Les appareils placés aux deux stations

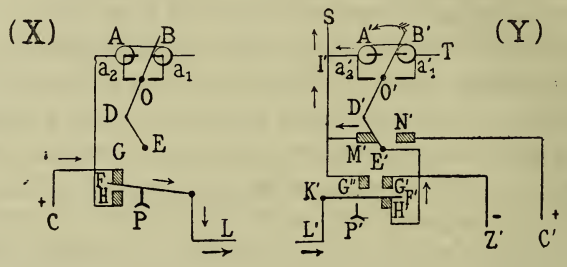


Fig. 468.

sont absolument symétriques l'un de l'autre : la partie indicatrice de l'un est relié par un fil de ligne à la partie réceptrice de l'autre ; le second fil sert pour la liaison des autres parties dont nous n'avons pas à nous occuper.

Soient (fig. 467) les appareils au repos : les palettes OB et O'B' sont appuyées sur les bobines a_1 et a'_1 les deux aiguilles sont verticales ;

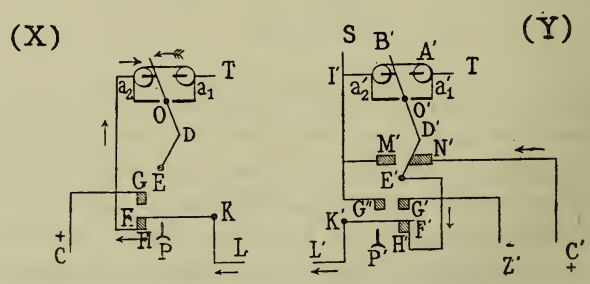


Fig. 469.

aucun courant ne passe, car les pôles des piles des deux stations sont isolés en G, G' et N'.

Le train passe à la station X et l'employé appuie sur le poussoir P ; le courant s'établit dans le circuit CGFKL (fig. 468) de l'appareil de cette station, parcourt la ligne parvient à la station Y, suit le chemin L'K'H'E'M' et se bifurque en I' : une partie traverse la sonnerie S

qu'elle met en jeu, l'autre partie traverse l'électro-aimant A′ pour aller à la terre T; ce courant a pour effet de polariser en sens contraire la bobine a'_1, ce qui fait basculer la palette D′OB′, inclinant l'aiguille correspondante : par suite de ce mouvement les contacts changent ; D′E′ quitte M′ et s'appuie sur N′ (fig. 469). Il résulte de la première action que la station X ne pourra envoyer aucun courant dans les bobines de l'appareil de Y et ne pourra par suite changer la position de l'aiguille. La seconde action, amenant D′E′ au contact de N′ produit l'émission d'un courant qui va de Y vers X en suivant le chemin C′N′E′H′K′L′, traverse la ligne, puis, arrivant en X, parcourt le trajet LKH et arrive à l'électro-aimant A dans un sens tel qu'il déplace la palette l'amène contre la bobine a_2 et incline l'aiguille.

Il est facile de reconnaître que, à la station X, il est impossible de déplacer l'aiguille, car on ne peut provoquer le passage d'aucun

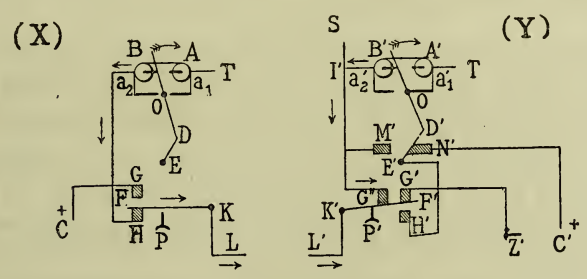


Fig. 470.

courant dans l'électro-aimant; nous avons déjà dit que cette station ne peut non plus agir sur l'aiguille de Y.

Mais, quand le train passe en Y, l'employé appuie sur le poussoir P′, déplace le levier K′F′ (fig. 470) et provoque un courant qui passe en partie dans l'appareil de Y même et en partie dans l'appareil de X; mais c'est un courant inverse; il part de Z′ et arrive en G′F′, puis se bifurque en G″; une partie arrive à la sonnerie, l'autre à l'électro-aimant A′; enfin une dernière partie suit le trajet G″K′L′LKHF et arrive à l'électro-aimant A. Ce courant inverse produit nécessairement un effet opposé à celui du courant direct, c'est-à-dire qu'il ramène les palettes à leurs positions primitives en a_1 et a'_1, et les aiguilles à la verticale. L'appareil est prêt pour une nouvelle opération en même temps que la voie a cessé d'être bloquée.

Les autres moitiés des appareils reliés par le deuxième fil de ligne servent aux indications correspondant aux mouvements des trains dans la section qui précède X et dans celle qui suit Y.

Cet appareil dont nous nous sommes borné à indiquer le principe général se prête à des modifications correspondant à des besoins divers; c'est ainsi qu'on peut par l'adjonction de contacts métalliques et de communications l'utiliser pour l'exploitation à voie unique, qu'il est possible de le relier électriquement aux signaux qui couvrent les stations de manière que les mouvements de ces signaux ne puissent être produits ou effacés que lorsque les indications fournies par les aiguilles sont bien en concordance avec ces mouvements; etc. Mais il suffit des explications que nous avons données pour montrer l'utilité et la commodité de cet appareil.

598. Correspondances télégraphiques avec les trains en marche. — On a cherché à diverses reprises à établir des relations télégraphiques entre un train en marche et les stations ou entre deux trains en marche sur la même voie; on comprend que ces communications assureraient l'exploitation et rendraient impossibles les rencontres de train.

Plusieurs systèmes ont été proposés et même essayés, ils n'ont pas paru donner des résultats vraiment pratiques et ils n'ont pas été réellement appliqués. La principale difficulté consiste dans les liaisons à établir entre les appareils, emportés par le train en mouvement, et la ligne, qui est un conducteur immobile; la nécessité d'obtenir et de maintenir un contact continu s'impose et est difficile à réaliser.

Un nouveau système qui ne présente pas cette difficulté a été imaginé par M. Phelps et a donné en Amérique, paraît-il, d'importants résultats. Il repose sur la production des courants induits et n'exige aucune liaison matérielle entre le conducteur fixe et les appareils mobiles. Le principe général consiste en ce que la production et la cessation de courants dans un conducteur font naître des courants induits dans un circuit voisin : l'effet n'est pas modifié par les mouvements que peut avoir le circuit parallèlement au conducteur fixe. Peut-être le phénomène serait-il profondément modifié si la vitesse de déplacement du circuit était du même ordre de grandeur que la vitesse de propagation de l'électricité ? Mais il ne se présente rien de semblable dans la pratique.

Le système Phelps comporte un conducteur fixe bien isolé et placé au milieu de la voie, à une certaine distance au-dessus du sol : à la gare, ce conducteur est relié à une station dont la disposition est celle d'une station télégraphique ordinaire. Des appareils, pile, sonnerie, transmetteur, récepteur sont placés dans un fourgon attelé au train et sont reliés à un fil constituant une vaste bobine,

ou pour mieux dire un vaste cadre rectangulaire dont un côté est placé parallèlement à la voie et le plus près possible du conducteur fixe; ce côté doit avoir la plus grande longueur possible; le côté opposé doit être assez éloigné du conducteur; il peut par exemple passer sur le toit du wagon. Il est facile de voir que les côtés verticaux sont sans influence.

On conçoit que si de la station on émet des courants interrompus dans le conducteur fixe, ces courants feront naître dans la bobine des courants induits qui pourront être mis en évidence par les appareils placés dans le fourgon; et inversement d'ailleurs, car il y a évidemment reversibilité dans ce système.

Les courants induits qui prennent naissance dans ce cas sont très faibles et ne peuvent agir directement sur les récepteurs; il faut intercaler un relais très sensible; M. Phelps en a d'ailleurs disposé un spécialement dans ce but.

On peut également faire la réception par l'intermédiaire d'un téléphone, et on reçoit directement l'impression, même quand le fil conducteur fixe est isolé de plusieurs mètres du cadre mobile.

Nous ne pouvons qu'indiquer le principe général de cet intéressant système qui n'a pas encore été essayé en France[1].

597. Du téléphone; généralités. — Bien qu'il ne soit pas douteux que Reis ait construit un appareil susceptible de transmettre à distance par l'intermédiaire des courants électriques non seulement des sons musicaux, mais encore la parole articulée, ce n'est que depuis l'invention par Graham Bell du merveilleux appareil auquel il a donné le nom de *téléphone* que la transmission de la parole à distance est entrée dans la pratique; il serait sans intérêt de décrire l'appareil de Reis non plus que de discuter si l'invention du téléphone ne peut pas être revendiquée par Elisha Gray; il semble d'ailleurs sur ce dernier point que la discussion est terminée et que Graham Bell a la priorité.

Malgré la complexité du phénomène qu'il s'agit de transmettre, le téléphone est un appareil d'une remarquable simplicité qui possède la propriété intéressante de la réversibilité : sous l'influence des sons, de la parole, il donne naissance à des courants électriques et, dans des conditions convenables, sous l'influence de courants, il reproduit des sons.

Le téléphone est constitué (fig. 471) par un barreau rectiligne

1. Pendant l'impression, on annonce d'Amérique que M. Edison a inventé un système ayant le même but, mais reposant sur un principe différent. Les détails manquent encore et nous ne pouvons le décrire.

aimanté placé dans une garniture en bois ; une bobine recouverte de fils isolés entoure l'une des régions polaires au-dessus de laquelle se trouve un diaphragme de fer mince, maintenu par sa circonférence, serré dans la garniture en bois qui supérieurement est creusée au centre et forme une sorte de cornet ou entonnoir très évasé au fond duquel apparaît le diaphragme.

Cet appareil sert à volonté de transmetteur et de récepteur ; pour

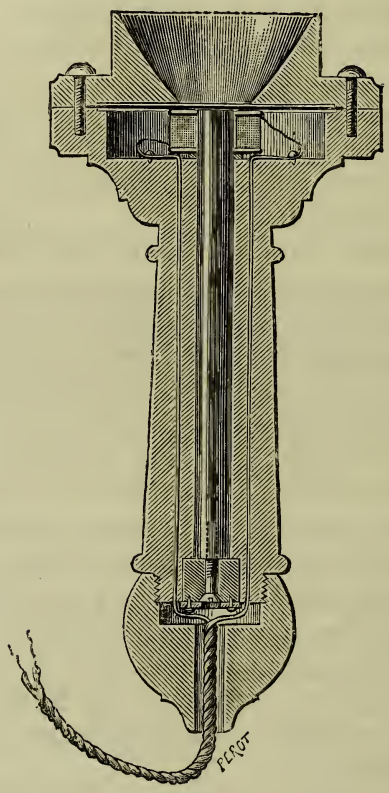


Fig. 471. — Téléphone.

l'utiliser on réunit les fils de deux téléphones par deux conducteurs de manière à former un circuit complet ; on peut encore n'employer qu'un seul fil en mettant en communication avec la terre les autres extrémités du fil de chaque téléphone. Si l'on vient alors à produire des sons, à chanter, à parler en approchant la bouche du cornet de l'un des téléphones un observateur placé à l'autre extrémité du circuit et mettant le téléphone à son oreille entend très distinctement

les sons émis, reconnaît le chant et distingue les paroles. La reproduction n'est pas absolument parfaite et l'on observe une légère modification dans le timbre.

600. — Quels sont les phénomènes qui se produisent dans ces conditions? Ils ne sont pas absolument connus et sur certains points il y a des doutes qui n'ont point encore été levés.

Lorsque l'on produit un son devant le téléphone transmetteur, on met l'air en vibration et, par suite, la plaque du téléphone vibre synchroniquement devant le barreau aimanté; il se produit dans celui-ci, par influence, des variations magnétiques dans la région polaire, les lignes de force se déplacent périodiquement et synchroniquement aux vibrations de la plaque et, comme conséquence, des courants induits prennent naissance dans la bobine et se propagent dans le circuit, courants induits dont la périodicité est déterminée par celle des vibrations de la plaque.

Ces courants induits parviennent au téléphone récepteur; on avait pensé d'abord que les phénomènes qui se produisaient dans cet organe étaient identiques, à l'ordre près, à ceux qui se passent dans le transmetteur; les variations des courants induits auraient pour effet de faire varier l'aimantation du barreau, l'augmentant et la diminuant périodiquement suivant le sens de ce courant, augmentant et diminuant, par conséquent, la force attractive avec laquelle il agit sur la plaque de fer et celle-ci soumise à des attractions variant périodiquement entrerait en vibration; son mouvement vibratoire serait communiqué à l'air, puis à l'oreille de l'auditeur.

Mais cette explication simple ne paraît pas pouvoir être acceptée; sans nier que la plaque ne joue un rôle et ne serve à renforcer le son produit, on s'est assuré qu'elle n'est pas nécessaire au fonctionnement de l'appareil. Il a été possible d'entendre les sons produits, à l'aide d'un téléphone récepteur constitué uniquement par le barreau aimanté et la bobine.

L'explication qu'il convient de donner dans ce cas s'appuie sur une expérience ancienne de Page dont d'ailleurs la théorie n'est pas déterminée. Page a montré que si dans un électro-aimant constitué par une tige rectiligne de fer entourée d'une hélice, on fait passer des courants périodiquement et rapidement intermittents, la tige métallique rend un son. On ne pense pas que ce son soit dû à un mouvement vibratoire que prendrait la tige de fer comme si on agissait sur elle à l'aide d'un archet et l'on serait disposé à penser qu'il s'agit d'un mouvement vibratoire moléculaire produit et entretenu par les courants intermittents. Mais quelle qu'en soit l'explication

le fait existe : on conçoit dès lors qu'il puisse être invoqué dans la théorie du téléphone, le son produit est dû au barreau aimanté même sous l'influence des courants interrompus qui traversent la bobine, les autres pièces, le diaphragme notamment n'ayant d'autre effet que de renforcer le son.

601. — M. Mercadier a montré par des expériences variées que les actions qui se produisent dans le transmetteur ne sont pas aussi simples qu'on l'avait pensé tout d'abord et que ce n'est pas, comme nous l'avons dit, le mouvement vibratoire du diaphragme qui agit pour faire naître les courants induits. Il a montré par des considérations d'acoustique appuyées par des expériences directes que les diaphragmes employés ne vibrent pas effectivement sous l'influence des sons émis : ils transmettent seulement le mouvement vibratoire comme le font les corps élastiques, mais sans vibrer eux-mêmes.

Recherchant alors la cause et les conditions du fonctionnement des téléphones, il a trouvé qu'il fallait produire un changement dans les lignes de force du champ magnétique, des déformations mécaniques directes.

Étant donné un téléphone dont le diaphragme en fer est remplacé par une lame quelconque, une feuille de papier, par exemple, il a reconnu que l'appareil ne peut fonctionner; mais il devient susceptible de transmettre un son si l'on projette sur le papier une quantité même très faible de limaille de fer qui dessine précisément les lignes de force. L'intensité du son transmis dépend, jusqu'à une certaine limite de la quantité de limaille de fer employée. Ce téléphone est d'ailleurs réversible et peut servir de récepteur ; l'intensité du son recueilli est faible, il est vrai, mais on peut l'augmenter en augmentant l'intensité du champ magnétique.

602. — La transmission d'un son musical, sa reproduction au point de vue de la hauteur se comprend aisément étant donné le mode de fonctionnement du téléphone ; les vibrations du récepteur sont nécessairement synchrones de celles du transmetteur ; le son reçu a par suite la même hauteur que le son transmis. Il n'y a pas plus de difficulté à concevoir que l'on puisse apprécier des intensités relatives ; l'intensité dépend de l'amplitude des vibrations; il est aisé de comprendre que, dans le transmetteur, les actions magnétiques et électriques seront d'autant plus énergiques que la plaque vibrera plus fort et, naturellement, dans le récepteur, les actions qui reproduisent le son sont en rapport avec la grandeur des courants électriques qui traversent l'appareil.

Il est moins aisé de s'expliquer comment sont transmis les carac-

tères qui permettent de distinguer les diverses lettres, les voyelles, comment est transmis le timbre, en un mot; les idées de Graham Bell sur ce qu'il appelle les courants ondulatoires qui existeraient dans le téléphone et qu'il oppose à ce qu'il nomme les courants d'impulsion, ces idées ne nous paraissent pas fort claires, nous ne croyons donc pas devoir y insister, car nous voyons de sérieuses objections à cette théorie.

Pour comprendre cette transmission du timbre, il faut d'abord rappeler de quoi dépend cette qualité. Les travaux d'Helmholtz ont conduit à admettre que le timbre d'un son est dû à la sensation inconsciente de sons accessoires s'ajoutant au son principal, se fondant dans le son principal, pour ainsi dire. Peut-être n'est-ce pas là tout ce qui détermine le timbre, mais c'est certainement un élément important. Transmettre un timbre, c'est donc transmettre simultanément le son principal et les sons accessoires qui l'accompagnent de manière qu'ils coexistent dans le récepteur comme ils coexistaient dans le transmetteur. Mais la coexistence, au départ, du son principal et des sons accessoires correspond à un mouvement vibratoire de *forme* déterminée et c'est cette forme de mouvement vibratoire qu'il faut reproduire : il faut que, à l'arrivée, la loi du mouvement vibratoire soit la même qu'au départ. On peut concevoir qu'il en soit ainsi dans le téléphone de Bell : non seulement il y a synchronisme entre les courants induits produits, mais il existe une relation plus directe. Le courant induit qui prend naissance à un moment quelconque est évidemment lié comme intensité à la vitesse de la variation magnétique de l'aimant et celle-ci dépend nécessairement de la vitesse au même instant de la plaque vibrante. Il y a donc une relation directe entre la loi du mouvement vibratoire de la plaque, entre la forme de sa vibration, et la loi que suivent les courants induits qui prennent naissance.

Dans le récepteur une relation du même genre existe certainement et la loi du mouvement vibratoire qui prend naissance et produit le son dépend de la loi du courant qui traverse l'appareil; il résulte de là que, en somme, la loi du mouvement vibratoire du récepteur dépend nécessairement de la loi du mouvement vibratoire dans le transmetteur. Cette dépendance est forcée, mais on ne pouvait prévoir absolument qu'elle consisterait dans la reproduction à peu près identique à l'arrivée, à l'intensité près, de la loi du mouvement vibratoire qui existait au départ. C'est cette reproduction suivant la même loi et non suivant une autre loi qui est le caractère spécial, particulier du téléphone.

On comprend que cette reproduction puisse exister ; elle serait même presque nécessaire si, comme on l'avait pensé d'abord, le son était produit dans le récepteur par les vibrations de la plaque : la réversion des actions n'aurait pas existé seulement alors par l'effet, comparé à la cause, mais elle se serait manifestée dans tous les détails et la reproduction identique eût été presque certaine *a priori*. Il n'en est pas de même en réalité, puisque le phénomène à l'arrivée n'est pas tout à fait de même nature que celui qui existe à la transmission, et l'on n'aurait pu prévoir réellement, ou l'on ne pourrait expliquer complètement le fait de la reproduction identique que si l'on connaissait les lois qui régissent le phénomène de Page, ce qui n'est pas.

Il est d'autres appareils qui sont susceptibles de transmettre le son sans pouvoir transmettre la parole : cela tient à ce qu'ils reproduisent bien un mouvement de même *période*, mais non un mouvement ayant la même *loi*. Cette différence ne dépend pas de l'intermittence des courants élémentaires qui naîtraient brusquement pour cesser instantanément, comme Graham Bell l'a indiqué, car dans tous les cas il y aura au début une période de croissance (108) et à la fin une période de décroissance avant que le courant ne cesse ; ce seront de véritables courants ondulatoires. Seulement leur loi ne sera pas sous la dépendance de la loi du mouvement vibratoire, ou inversement ce sera dans le récepteur que la transformation modifiera la loi, toujours sans modifier la périodicité. Prenons des exemples pour faire comprendre cette idée.

603. — Dans un certain nombre d'appareils, le transmetteur est constitué par une membrane présentant en son centre une pointe métallique placée à peu de distance d'un contact, métallique également : lorsque ces pointes se touchent, le circuit est fermé, il est ouvert lorsqu'elles se séparent. Si l'on produit un son devant la membrane il y aura un contact à chaque vibration et par suite un courant ; mais la loi que suit ce courant, loi qui déterminera la loi de vibration dans le téléphone récepteur, cette loi n'est pas liée à la loi de vibration de la membrane, elle est seulement la loi qui régit les états variables de fermeture et de rupture. Le *timbre* du son perçu dans le téléphone récepteur n'aura donc aucune relation avec le *timbre* du son transmis puisque la loi des vibrations ne sera pas la même ; seule, la hauteur sera conservée. On reconnaîtra donc une mélodie, on ne pourra reconnaître la parole, car on ne pourra, par exemple, distinguer les diverses voyelles.

Dans d'autres cas, les courants qui prennent naissance lors de la

transmission sont bien liés dans leurs variations à la loi des vibrations sonores; mais les courants servent, plus ou moins directement, à charger un condensateur qui se décharge ensuite à travers un circuit spécial; ce sont ces charges et ces décharges qui produisent le son. Elles sont évidemment synchrones aux vibrations qui produisent des courants et reproduisent, par conséquent la *hauteur* du son ; mais les vibrations auxquelles elles donnent naissance, produites par un mécanisme tout autre que celui qui a fonctionné à la transmission, obéissent à des lois propres qui président à ces charges et décharges du condensateur ; elles ne sont plus régies par les lois qui caractérisent les vibrations initiales, le timbre du son est modifié, l'appareil ne peut transmettre la parole. Disons cependant que, par l'emploi de dispositions spéciales, on a pu obvier à cet inconvénient et qu'il a été possible d'obtenir un condensateur parlant. Mais cela n'enlève rien à la valeur de la remarque que nous venons de faire sur la disposition simple qui constitue le condensateur chantant.

604. — Nous reviendrons plus loin sur quelques modifications de forme et de détails qui ont été appliquées au téléphone et nous allons passer en revue les principes différents qui ont été utilisés pour améliorer les conditions de la transmission téléphonique.

Comme il est facile de le concevoir par le mode de fonctionnement du transmetteur, les courants qui prennent naissance sont excessivement faibles; d'après les recherches de Warren de la Rue, ils auraient une valeur de l'ordre des cent-millionièmes d'ampère. Ce sont ces courants extrêmement minimes qui suffisent pour mettre en action le téléphone récepteur; comme nous l'indiquerons, cette sensibilité extraordinaire du téléphone récepteur a été utilisée dans diverses circonstances.

On conçoit que l'effet obtenu, dans les conditions que nous avons indiquées, soit de peu d'intensité, que les sons recueillis dans le récepteur soient peu intenses; ils ne sauraient représenter toute l'énergie dépensée dans le transmetteur, parce qu'il y a perte à chaque transformation de l'énergie, et parce que le passage du courant dans le circuit correspond, en vertu de la loi de Joule, à une dépense d'énergie. On peut même prévoir, et l'expérience le confirme, que, cette dernière dépense augmentant avec la longueur du circuit, l'intensité du son recueilli diminuera lorsque la distance augmentera; il pourra s'affaiblir assez pour que l'audition cesse d'être nette. La distance peut cependant atteindre plus de 10 kilomètres sans que les sons cessent d'être perceptibles.

On conçoit que cet inconvénient pourrait être évité et que rien ne limiterait la distance à laquelle la transmission est possible si l'on pouvait utiliser un courant ayant une origine extérieure au système, et que le téléphone transmetteur eût seulement à régler, à distribuer l'intensité du courant suivant la loi correspondant aux vibrations des sons émis. L'appareil de Graham Bell ne peut satisfaire à cette condition, que l'on a réalisée de diverses façons ; nous nous arrêterons seulement à celle qui, sous des formes variées, est entrée dans la pratique. Un nouveau principe dont l'application possible avait à peine été entrevue a servi de point de départ au téléphone à pile d'Edison et au microphone de Hughes; ce principe consiste dans l'utilisation des variations de résistance qui se produisent au contact de corps médiocrement conducteurs : lorsqu'un corps médiocrement conducteur, comme un fragment de charbon, est en contact avec un autre conducteur, le moindre déplacement qui produit des variations de position imperceptibles suffit pour faire changer la résistance dans des proportions très notables.

Voici comment M. Edison appliqua ce principe à la construction d'un transmetteur : l'appareil comprend une embouchure évasée derrière laquelle se trouve une plaque vibrante comme dans le téléphone Bell. Au centre de la plaque est fixée une petite lame de platine par l'intermédiaire d'un support mince en ivoire, la lame de platine appuie contre une pastille de charbon, charbon artificiel de constitution spéciale, et la pastille repose d'autre part sur une pièce métallique que l'on peut avancer ou reculer à l'aide d'un pas de vis, ce qui permet le réglage de l'appareil en produisant un contact plus ou moins intime. L'appareil est intercalé dans le circuit, de manière que le courant passe d'une lame métallique à l'autre à travers la pastille de charbon ; le circuit comprend en outre une pile dont la puissance doit être proportionnée à la distance à franchir et un récepteur qui est un téléphone Bell (ou un téléphone basé sur le même principe).

Le courant passant d'une manière continue, tant que le transmetteur ne fonctionne pas, le récepteur n'agira pas et restera silencieux, puisque les vibrations ne peuvent s'y produire qu'à la suite d'interruptions ou au moins de variations d'intensité. Mais lorsque l'on vient à produire un son devant le transmetteur, la plaque entrant en vibrations, le charbon se trouvera pressé plus ou moins, alternativement, entre les pièces métalliques ; la résistance du circuit variera et, par suite, l'intensité du courant variera aussi périodiquement, le récepteur entrera donc en action.

On conçoit aisément que les variations de résistance étant produites par les vibrations de la plaque du transmetteur soient synchrones à ces vibrations et que, par suite, les vibrations du récepteur soient synchrones également et qu'elles reproduisent par conséquent un son de même hauteur que le son transmis; on eût pu le prévoir. Mais il n'en est pas de même du timbre, car l'action qui se produit dans le transmetteur étant d'une nature tout autre que celle qui se manifeste dans le récepteur, on ne pouvait affirmer que la loi de vibration de la plaque du transmetteur serait reproduite dans la vibration du récepteur. Cette conservation de la forme du mouvement vibratoire est très remarquable et met en évidence l'extrême sensibilité de l'organe constitué par le contact à charbons.

D'autres modèles de téléphones à charbon ont été imaginés, ils

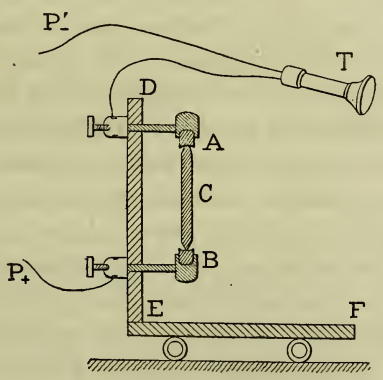


Fig. 472. — Principe du microphone de Hughes.

présentent quelques variations de détails, mais appliquent en somme le même principe que l'appareil que nous venons de décrire : nous ne nous y arrêterons pas.

605. — Il est nécessaire, au contraire, d'insister sur le *microphone* de Hughes, appareil qui utilise également les variations de résistance des charbons en contact, mais qui diffère cependant sur un point essentiel du téléphone d'Edison. Le microphone, sous sa forme classique la plus simple, consiste en trois morceaux de charbon; deux d'entre eux A, B (fig. 472) sont fixés à une planchette verticale ; sur les faces en regard ils présentent des cavités dans lesquelles pénètrent les extrémités taillées en pointes du troisième charbon C qui est placé verticalement ou à peu près. Les charbons sont intercalés dans un circuit comprenant une pile et un récepteur, un téléphone Bell par exemple. Tant que les charbons resteront immobiles abso-

lument, le courant conservera la même intensité et l'on n'entendra aucun son dans le téléphone ; mais si, directement ou indirectement, des secousses, des vibrations sont communiquées à la planchette qui supporte les charbons, il se produira de légers déplacements du charbon mobile, déplacements qui, modifiant les contacts, feront varier la résistance et par suite produiront des changements dans l'intensité. La planchette pourra être mise en vibrations par un son que l'on produira dans le voisinage ; ce son sera reproduit dans le téléphone récepteur et, comme nous l'avons dit pour le transmetteur à charbon d'Edison, non seulement avec sa hauteur, mais encore avec son timbre, de telle sorte que la parole pourra être transmise par le système de la pile, du microphone et du téléphone récepteur. Comme dans l'appareil d'Edison, l'intensité du son recueilli par le récepteur ne dépend pas seulement de l'intensité du son émis, mais de la grandeur des variations de l'intensité du courant; cette grandeur dépend elle-même de l'intensité du courant et de l'importance des variations de la résistance ; de telle sorte que non seulement le son reçu n'est pas nécessairement plus faible que le son émis, mais que même il peut être plus fort et même dans une proportion notable. Aussi, on peut entendre un son dans le téléphone récepteur alors que les secousses, les vibrations communiquées au microphone sont tellement minimes qu'elles ne produisent pas un son directement perceptible.

Ainsi, il suffit de frotter la planchette du microphone aussi légèrement que possible avec un corps dur pour donner dans le téléphone un son, un bruit très net; il suffit d'un insecte marchant sur la planchette d'un microphone sensible pour donner dans le récepteur un bruit distinct. On peut dire que dans ces circonstances il y avait un bruit ou un son qui était produit, mais avec une intensité trop faible pour être perçue par notre oreille; le microphone amplifie le son ou plutôt le remplace par un autre son beaucoup plus intense. C'est cette propriété qui, dans une certaine mesure, établit une analogie entre le microscope et le microphone qui a fait donner le nom à cet appareil.

La forme que nous avons indiquée pour le microphone, forme qui est des plus simples, a été modifiée de diverses manières sans apporter de changements au principe même. Nous décrirons par la suite quelques-uns des modèles adoptés dans diverses circonstances ; mais nous indiquerons d'abord quelques points importants qui ne sont pas particuliers à un système spécial de téléphones, mais qui se rencontrent dans tous les systèmes.

606. Influence de la distance sur les transmissions téléphoniques. — L'intensité du son recueilli dans le téléphone récepteur dépend de la grandeur des variations du courant qui le traverse et, comme nous le disions plus haut, celle-ci est liée à l'intensité du courant et à la valeur des variations de résistance qui se produisent dans le microphone ou dans le téléphone à charbon; mais ce n'est pas le seul élément et il est nécessaire de tenir compte en outre de la résistance totale du circuit, et, par conséquent, de la distance qui sépare le transmetteur du récepteur. Pour un son donné, en effet, les variations de résistance sont toujours les mêmes; mais elles produisent des effets différents suivant la valeur de la résistance totale. Supposons, en effet, que la résistance totale soit représentée par 10 et que la variation de résistance ait une valeur égale à 1, cette variation représente $\frac{1}{10}$ de la valeur totale. La variation restant la même, si la résistance totale est devenue dix fois plus grande, si elle est représentée par 100, la variation de résistance sera alors $\frac{1}{100}$ de la valeur totale. Lors même que l'on aurait augmenté la force de la pile de manière que le courant ait la même valeur dans le second cas que dans le premier, la variation d'intensité du courant se trouverait réduite à peu près à $\frac{1}{10}$ de ce qu'elle était précédemment [1]. L'intensité du son produit, qui dépend de la

1. Dans le premier cas I et I′ étaient les intensités, on avait

$$I = \frac{E}{10}$$

et

$$I' = \frac{E}{10 + 1} = \frac{E}{11}$$

d'où l'on déduit

$$I' - I' = \frac{E}{110}.$$

Dans le deuxième cas, il faut prendre une pile dix fois plus forte de manière à conserver la valeur de I,

$$I = \frac{10\,E}{100}\ ;$$

si I′ est la valeur après l'augmentation de résistance, on a

$$I' = \frac{10\,E}{100 + 1} = \frac{10\,E}{101}$$

et il vient

$$I - I' = \frac{E}{1010},$$

valeur à *peu près* dix fois moindre que la précédente.

grandeur de la variation, sera donc notablement diminuée. Dans la transmission téléphonique directe, il faut donc, pour les grandes distances, avoir des courants très puissants ou employer des transmetteurs d'une grande sensibilité.

607. — On est parvenu à correspondre téléphoniquement à grande distance en modifiant les conditions de la transmission : le transmetteur n'est alors plus relié directement au récepteur, le circuit qui le comprend contient la pile P (fig. 473) et le fil inducteur, fil gros et court, de peu de résistance, d'une bobine d'induction B; d'autre part le fil induit de cette bobine et le récepteur T constituent un autre circuit. Le circuit du transmetteur ayant une assez faible résistance, les variations de résistance et, par suite, les variations d'intensité du courant auront une grande importance *relative*. Les courants induits qui prennent naissance dans la bobine, dépendent, pour une bobine donnée, de ces variations relatives; ils

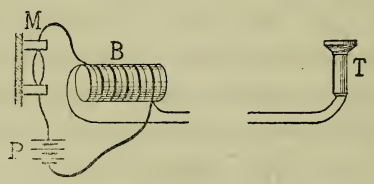


Fig. 473.

dépendent aussi de la bobine elle-même, du nombre de spires du fil induit et, quelle que soit la distance (jusqu'à une certaine limite, au moins), on peut obtenir que des variations données produisent des courants induits de même intensité. Il faudra donc, toutes choses égales d'ailleurs, augmenter le nombre des spires induites au fur et à mesure que la distance deviendra plus grande.

Nous ferons ici la même remarque que nous avons déjà indiquée précédemment. Il semble naturel que, dans cette transmission indirecte, la hauteur du son soit conservée puisque chaque variation du courant inducteur, qui correspond à une vibration dans le transmetteur, produit une variation et une seule dans le circuit du récepteur; que, par suite, la hauteur des sons puisse ainsi être transmise. Mais il est remarquable que, dans ces transformations multiples, la loi de la vibration soit conservée, sinon dans son intégrité, du moins d'une manière suffisamment complète pour que le timbre soit conservé, ce qui est prouvé non seulement parce que l'on peut transmettre très nettement la parole articulée, mais encore par ce

fait que prouve l'expérience journalière, c'est que, dans les communications téléphoniques, même à grande distance il est aisé de reconnaître, par le timbre de la voix, la personne qui parle.

608. Induction dans les fils téléphoniques. — Le téléphone récepteur entre en action, nous l'avons dit sous l'influence de courants extrêmement faibles, c'est un appareil d'une excessive sensibilité et, comme nous le disons, cette propriété a été mise à profit dans diverses circonstances. Mais, à certains égards, cette sensibilité présente des inconvénients. C'est ainsi que lorsque l'on fait usage comme transmetteurs de microphones extrêmement sensibles, comme il est nécessaire dans certaines recherches, il faut soustraire cet appareil aux excitations extérieures, en le plaçant, par exemple, sur une pierre scellée dans un gros mur; il convient également que son support soit muni de pieds en caoutchouc qui évitent que les vibrations ou secousses du bâtiment ne lui soient communiquées.

Mais c'est surtout l'induction provenant de fils voisins qui est un obstacle sérieux dans les communications téléphoniques telles qu'elles se présentent dans la pratique. Pour une communication téléphonique il suffit comme nous l'avons dit de relier le récepteur au transmetteur par un fil et de mettre, d'autre part, chacun de ces appareils en communication avec la terre. Supposons, et c'est le cas ordinaire dans la pratique, que sur tout ou partie de la la ligne, du fil de communication, il y ait à une certaine distance, quelques centimètres, quelques décimètres même, un autre fil téléphonique ou un fil télégraphique. Lorsque ce second fil servira à transmettre une conversation ou une dépêche, il sera traversé par des courants, non des courants continus, mais des courants interrompus ou variables : ces courants produiront, par induction, des courants dans le premier fil considéré et le téléphone correspondant entrera en action faisant entendre des bruits ou des sons plus ou moins distincts. Si l'induction est produite par une transmission télégraphique, on entendra des bruits sans suite; mais il pourra n'en être pas de même si l'induction est produite par une transmission téléphonique, les courants induits, dans leurs variations, suivront les courants inducteurs et donneront dans le récepteur du premier circuit les mêmes effets, à l'intensité près, que donnent les courants inducteurs dans le récepteur qu'ils parcourent. Si l'intensité est faible, il pourra n'en résulter qu'un bruissement indistinct qui aura seulement pour effet de gêner la transmission directe que l'on établirait dans le premier circuit; mais l'intensité pourra être suffisante pour que dans le premier récepteur on entende distincte-

ment la conversation qui est transmise dans le deuxième circuit. Dans l'un et l'autre cas, il y a un inconvénient grave auquel il est nécessaire de remédier.

609. — Divers systèmes ont été proposés; le seul qui, dans la pratique, ait donné des résultats satisfaisants, consiste à supprimer les communications des appareils avec la terre et à les réunir par un double fil de manière à former un circuit complet, les deux fils qui le constituent étant voisins l'un de l'autre; dans la pratique même, on construit à l'aide de ces fils convenablement isolés un

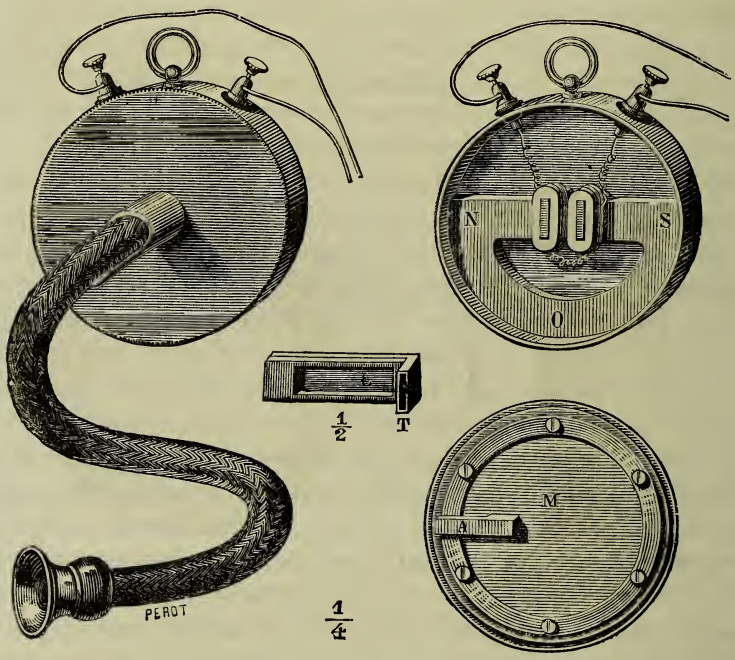


Fig. 474. — Téléphone Gower. (*Bréguet*.

cable qui souvent comprend également d'autres couples de fils répondant à autant de circuits distincts. On comprend que les actions d'induction qui prendront naissance se manifesteront également sur l'un et l'autre fil dans des conditions identiques; mais ces fils étant reliés à leurs extrémités, ces actions de même sens par rapport à l'inducteur, seront opposées les unes aux autres dans le circuit et se détruiront respectivement, faisant disparaître ainsi dans les téléphones toute action résultant de l'induction.

610. Systèmes divers de téléphones. — Sans rien changer au

principe même du téléphone qui ne sert guère d'ordinaire que comme récepteur, divers savants ont cherché à l'améliorer de manière à augmenter l'intensité des sons produits; nous ne saurions songer à décrire tous les modèles et nous nous bornerons à signaler ceux qui ont donné des résultats satisfaisants.

Le téléphone de Gower (fig. 474) est disposé de manière à utiliser l'action des deux pôles du barreau aimanté O; à cet effet celui-ci est recourbé et présente la forme demi-circulaire, les parties polaires N, S étant dirigées suivant le diamètre qui termine cette demi-circonférence et s'arrêtant à quelque distance du centre; cet aimant est placé dans une boîte circulaire et près de l'une des bases qui est constituée par la plaque vibrante. Aux pôles sont adaptées des pièces polaires de section allongée et sur lesquelles sont

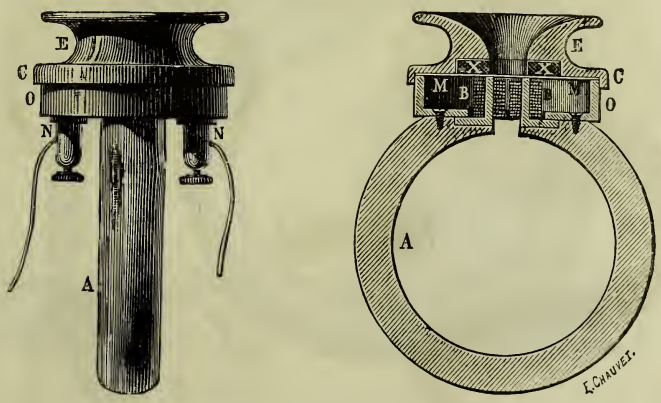


Fig. 475 et 476. — Téléphone Ader; élévation et coupe. (*Société générale des téléphones.*)

enroulés les fils où circuleront les courants induits, les spires de ces bobines étant ainsi parallèles à la plaque vibrante.

Dans cet appareil, l'embouchure est disposée à l'extrémité d'un tube flexible. Il y a, de plus, une disposition pour produire un appel perceptible à distance : en soufflant dans ce tube, on met en vibration une anche métallique dont les mouvements se transmettent au diaphragme qui vibre alors assez énergiquement pour que, dans le téléphone récepteur, il se produise un son d'une grande intensité.

Dans le téléphone Ader (fig. 475, 476) l'aimant A a une forme circulaire et sert de poignée à l'appareil; sur ses deux pôles sont fixés deux noyaux B en fer doux perpendiculaires au diaphragme et recouverts de fil : ce sont les bobines qui agissent ainsi près du

centre, comme dans l'appareil précédent. Mais ce qui caractérise cet appareil c'est la présence de l'autre côté du diaphragme d'un anneau circulaire de fer doux XX qui, polarisé par l'aimant, modifie le champ magnétique et concentre dans un espace restreint les lignes de force qui, sans sa présence, iraient en divergeant ; cette augmentation du champ magnétique dont les variations pro-

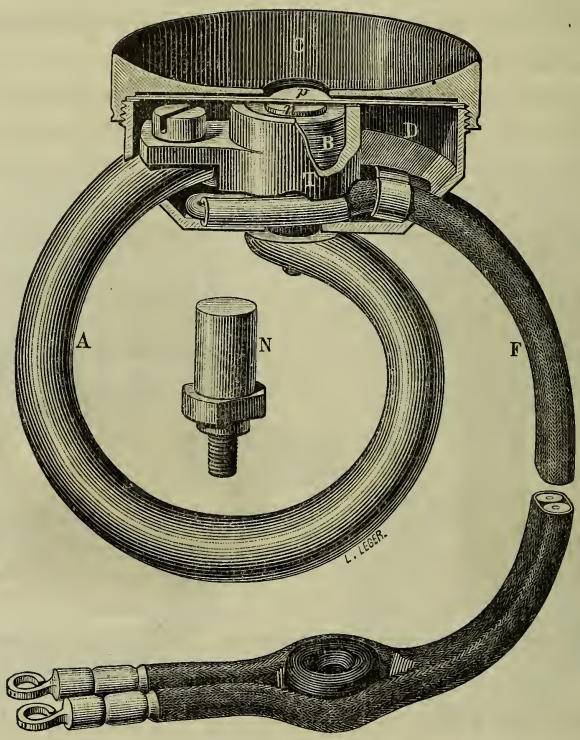


Fig. 477. — Téléphone d'Arsonval. (*La Lumière électrique.*)

duisent les sons, a en somme, naturellement pour effet d'accroître leur intensité.

M. d'Arsonval a disposé le téléphone d'une manière très rationnelle dans le but de concentrer autant que possible tout le champ magnétique, toutes les lignes de force, dans la partie où se trouvent les spires de la bobine. A cet effet, il obtient un champ magnétique circulaire à l'aide de deux pôles concentriques : l'aimant A (fig. 477) a une forme spiroïde; à une extrémité il porte un noyau de fer doux *n* sur lequel est enroulé le fil B ; l'autre extrémité porte un

cylindre creux de fer doux T qui entoure la bobine B de telle sorte que toute l'étendue du fil se trouve entre les deux pôles.

Le téléphone de M. Colson présente quelque analogie avec la disposition précédente quant à la forme des aimants qui constituent le champ magnétique; mais le diaphragme (fig. 478) est placé entre le noyau constituant le pôle central et le cylindre évidé qui représente l'autre pôle périphérique. Il semble que, dans ces conditions, les lignes de force et la plaque doivent avoir des actions réciproques plus énergiques que lorsque les deux pièces polaires sont d'un même côté du diaphragme.

Nous signalerons encore le récepteur de M. Ochorowicz (fig. 479) qui fait partie d'un système microtéléphonique reproduisant la

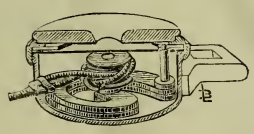


Fig. 478. — Téléphone Colson. (*De Branville.*)

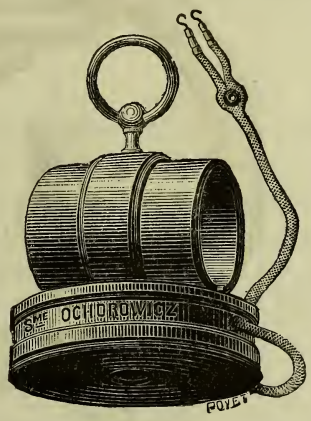


Fig. 479. — Téléphone Ochorowicz. (*Barbier.*)

parole à haute voix. D'après l'inventeur : « Le récepteur magnétique diffère de tous les appareils de ce genre : 1° par l'emploi de deux plaques vibrantes, également polarisées par le même aimant et embrassant les deux extrémités des bobines; 2° par le mode d'attache de la boîte téléphonique, qui, au lieu d'être immobile, vibre tout entière en même temps, étant fixée seulement par le milieu de la seconde plaque vibrante. »

611. Transmetteurs microphoniques. — Bien que les téléphones magnétiques puissent servir à la réception et à la transmission, en général, ainsi que nous l'avons déjà dit, la transmission se fait par l'intermédiaire d'un microphone. On a imaginé de nombreuses formes de microphones, sans que, au fond, on ait introduit aucun principe nouveau, mais seulement des dispositions variées : nous

décrirons seulement quelques modèles, parmi les plus usités.

Le transmetteur Ader (fig. 480 et 481) se compose d'une planchette en sapin fixée sur un support quelconque et sous laquelle sont maintenus trois charbons B, C, D placés parallèlement; dix crayons de charbon A disposés sur deux rangées s'appuient sur

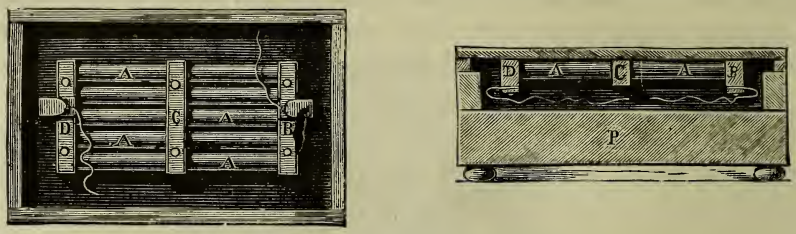


Fig. 480 et 481. — Plan et coupe du microphone Ader.

ces traverses dont les deux extrêmes sont reliés au circuit. Lorsqu'on parle devant la planchette, celle-ci reçoit les vibrations et les transmet aux charbons, ce qui modifie la résistance des contacts.

Dans le transmetteur microphonique de MM. Paul Bert et d'Arsonval, il y a une série de petits cylindres nickelés enfilés par une extrémité sur un axe commun et pesant par l'autre extrémité sur

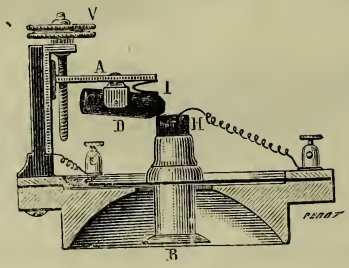


Fig. 482. — Microphone de M. Boudet de Pâris.

une baguette de charbon qui est fixée sur une planchette de bois léger; la planchette peut s'incliner plus ou moins, ce qui permet de faire varier la pression qui produit le contact. Les fils du circuit sont reliés d'une part à l'axe métallique commun, et, d'autre part, à la baguette de charbon, de telle sorte que tous les contacts sont montés parallèlement dans le circuit.

Une des questions importantes consiste à pouvoir régler le microphone, c'est-à-dire à pouvoir changer la pression qui produit le contact; nous venons de voir ce problème résolu dans le microphone précédent : en changeant l'inclinaison, on peut arriver à une très grande sensibilité.

Afin d'arriver à avoir une pression faible sous l'action d'un corps élastique permettant de légers déplacements, M. le docteur Boudet de Pâris prend pour pièce mobile un charbon D (fig. 482) traversé par un axe autour duquel il est en équilibre indifférent : ce charbon

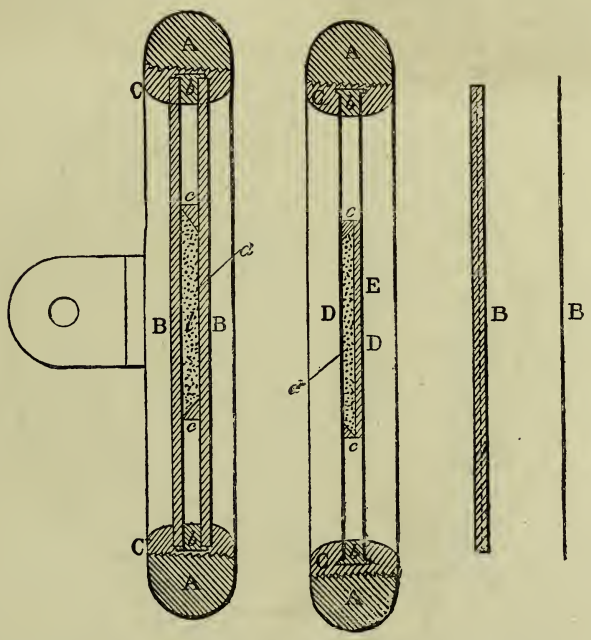


Fig. 483 et 484. — Transmetteurs Berthon, coupes. (*La Lumière électrique.*)

est maintenu appuyé sur une pièce fixe H, un autre morceau, une pastille de charbon à l'aide d'un petit morceau de papier I plié et formant ressort. Cette disposition a donné de bons résultats dans quelques cas spéciaux.

La Société générale des téléphones emploie de nouveaux transmetteurs formés par deux disques de charbon de cornue BB (fig. 483) sertis dans un anneau de métal C; entre ces deux disques se trouve une petite galette de charbon pulvérisé *l* maintenue en place par un anneau d'ébonite *c* collé sur un des disques de charbon.

On peut remplacer les disques de charbon par des plaques métal-

liques DD (fig. 484), sur l'une desquelles est collée une lame de charbon E.

612. — M. de Locht-Labye a imaginé divers appareils destinés à la transmission téléphonique; nous décrirons son téléphone à marteau qui peut servir comme transmetteur et comme récepteur.

Il comprend un aimant en fer à cheval CC (fig. 486 et 487) fixé verticalement sur une planchette : sur les régions polaires, qui sont à la partie supérieure, on a disposé deux bobines D dont les noyaux en fer doux se trouvent ainsi polarisés. Devant les extrémités libres de ces noyaux se trouve un contact en fer doux *f* qui en est à une

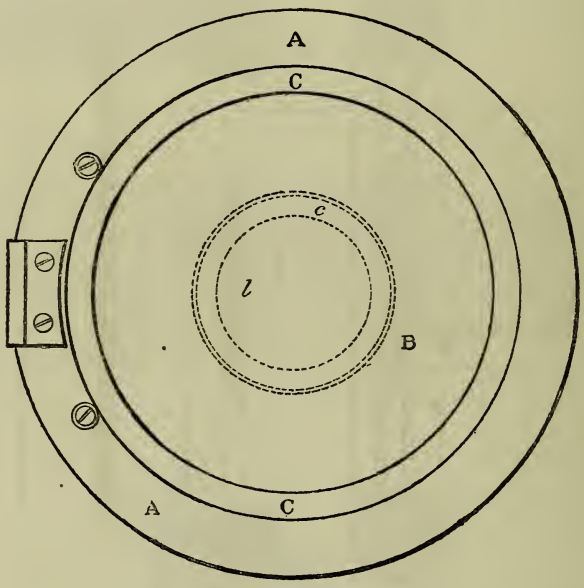


Fig. 485. — Élévation.

très petite distance; ce contact est une traverse horizontale montée à l'extrémité d'un levier rigide oscillant autour de l'axe *o;* à l'extrémité inférieure, ce levier porte un petit marteau métallique H fixé sur une vis régulatrice V.

Ce marteau pose sur une pièce rigide M à laquelle on a donné la forme circulaire qui, d'ailleurs, paraît indifférente, et qui est fixée par trois points de sa circonférence. Un pavillon acoustique est placé devant cette pièce.

L'émission de la parole devant cet ensemble cependant si peu mobile suffit pour déterminer des mouvements du levier et pour

produire des courants induits. D'après M. de Locht-Labye, il n'y a pas, dans ce cas, variation dans l'intensité du courant, mais il se produit des ruptures de contact qui amènent des interruptions de courant.

613. Emploi du téléphone comme galvanoscope. — Le téléphone, à cause de son excessive sensibilité qui lui permet de fonctionner sous l'influence de courants très faibles est un galvanoscope très précieux qui peut, directement ou indirectement, remplacer le galvanomètre dans un certain nombre de cas.

Pour reconnaître l'existence d'un courant dans un circuit, il ne

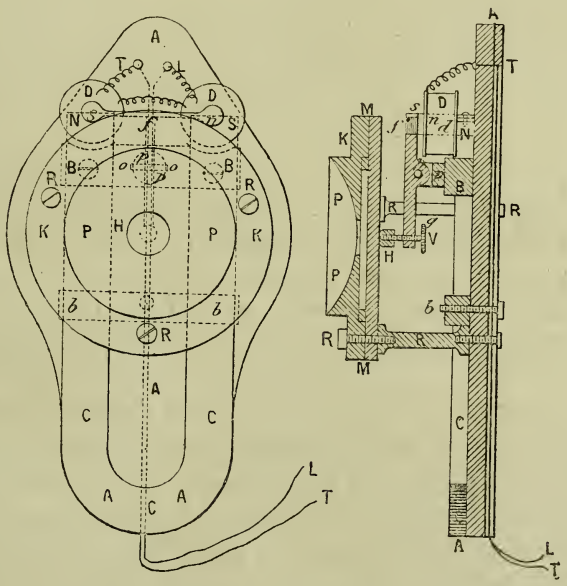


Fig. 486 et 487. — Téléphone à marteau. (*La Lumière électrique.*)

suffit pas d'intercaler un téléphone dans ce circuit : nous avons dit, en effet, que ce n'est pas le passage du courant, mais son interruption périodique ou ses variations périodiques, qui produit le son dans le téléphone. Ce ne sera dès lors que dans le cas où le courant considéré sera intermittent ou périodiquement variable que le téléphone ainsi employé directement pourra, en produisant un son, déceler l'existence du courant ; encore faudra-t-il que la durée de la période d'intermittence ou de variation soit très courte, une petite fraction de seconde. Si ces conditions ne sont pas réalisées, le téléphone ne produira aucun son.

Pour pouvoir utiliser le téléphone dans tous les cas, il faut placer, dans le circuit où on l'introduit, un interrupteur de courant, par exemple, un électro-diapason ou un mécanisme d'horlogerie produisant un effet analogue. On arrive au même résultat plus simplement encore en intercalant un microphone sur lequel on place une montre. Dans l'un et l'autre cas, le téléphone mis à l'oreille ne fera entendre aucun son si le circuit n'est pas traversé par un courant; mais on entendra un son s'il passe un courant même très faible: nous avons dit qu'il suffit d'un courant de quelques cent-millionièmes d'ampère pour produire cet effet.

614. — M. d'Arsonval a cherché, par une comparaison directe, à montrer la supériorité du téléphone sur les autres galvanoscopes, sur la grenouille préparée notamment. Pour cela, il se servait de l'appareil à chariot de Du Bois-Reymond et cherchait quelle distance il fallait établir entre les deux bobines pour faire cesser les contractions de la patte de grenouille mise en communication avec la bobine induite et pour faire cesser la production d'un bruit dans le téléphone substitué à la grenouille. Il a trouvé que dans ce dernier cas la distance était quinze fois plus grande que dans le premier. « Si l'on admet pour l'induction, ajoute-t-il, comme pour les actions à distance, la loi des carrés inverses, on voit que dans cette circonstance, le téléphone est au moins deux cents fois plus sensible que le nerf. »

Cette sensibilité du téléphone permet de l'employer très avantageusement à la place du galvanomètre toutes les fois qu'il s'agit de reconnaître l'existence ou la non-existence d'un courant, toutes les fois en un mot que l'opération consiste à la réduction au zéro. C'est ainsi que, par exemple, il peut être utilisé dans les expériences où l'on se sert du *pont de Wheatstone;* on intercale le téléphone avec un interrupteur mécanique ou un microphone à la place du galvanomètre. La même substitution peut se faire avantageusement dans les recherches thermométriques où l'on utilise les actions thermo-électriques pour reconnaître l'égalité ou l'inégalité de deux températures.

Le téléphone peut naturellement être employé directement et sans interrupteur dans le cas où l'on a des courants intermittents ou alternatifs à très courte période; ce serait, par exemple, le cas où l'on voudrait étudier le tétanos électrique d'un muscle.

615. Balance d'induction. — Mais si, employé comme nous venons de l'indiquer, le téléphone peut être utilisé pour reconnaître l'existence d'un courant, et remplacer le galvanomètre, il ne se

prête pas à des mesures, si ce n'est d'une manière vague : on peut bien, lorsque le circuit et l'interrupteur sont les mêmes, avoir une idée de la valeur comparative de l'intensité de plusieurs courants d'après un son perçu; mais outre qu'il y a là une appréciation délicate, ce n'est pas une mesure à proprement parler. Une application très intéressante du téléphone, imaginée par M. Hughes, la balance d'induction, permet dans un certain nombre de circonstances d'utiliser le téléphone pour faire des mesures quantitatives de diverses natures.

Réduite à sa plus simple expression, la balance d'induction, appareil différentiel, constitue ce que Hughes a appelé le sonomètre électrique. Il se compose essentiellement de deux bobines B, B′ (fig. 488) aussi identiques que possible, placées aux extrémités d'une règle divisée et faisant partie d'un circuit qui comprend une pile P et un interrupteur microphonique I; les communications sont établies

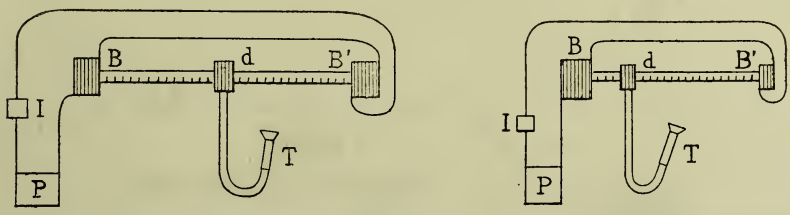


Fig. 488 et 489. — Sonomètre électrique.

de telle manière que le courant traverse en sens contraire les bobines. Entre celles-ci se trouve une autre bobine *d* qui peut se déplacer le long de la règle divisée; cette bobine dans laquelle des courants induits peuvent prendre naissance sous l'influence des bobines fait partie d'un circuit qui comprend un téléphone T; ce téléphone placé à l'oreille fera entendre un son lorsque la bobine sera traversée par des courants induits. Si la bobine *d* est située exactement au milieu de la distance qui sépare les bobines B et B′ et si celles-ci sont bien identiques, aucun effet ne se produira, les actions exercées par B et B′ étant égales et de sens contraire : le téléphone ne fera entendre aucun son. Mais si on vient à déplacer la bobine *d*, les actions des bobines B′ et B cesseront d'être égales, l'une d'elles deviendra prépondérante, la bobine *d* sera traversée par des courants induits et le téléphone produira un son. L'intensité de ce son, pour une même intensité du courant inducteur que l'on peut maintenir constant, dépendra nécessairement de la position de

la bobine *d* et sera caractérisée par cette position même. On pourra se servir de cette notion pour caractériser l'acuité de l'audition, cette acuité étant déterminée par la position occupée par la bobine mobile au moment où le son commence à être perçu.

Dans l'appareil que nous venons d'indiquer, l'effet sera le même quel que soit le sens dans lequel on déplace la bobine induite à partir de la position médiane : en réalité, il suffit de déplacer cette bobine toujours du même côté. On peut réduire l'appareil à des dimensions moindres en ayant deux bobines inductrices inégales B, B′ (fig. 489) ; leurs dimensions doivent être telles que, lorsque la bobine induite est dans le voisinage de la petite B′, à une position déterminée, l'action de celle-ci soit exactement contrebalancée par l'action de l'autre bobine B, l'augmentation de dimensions com-

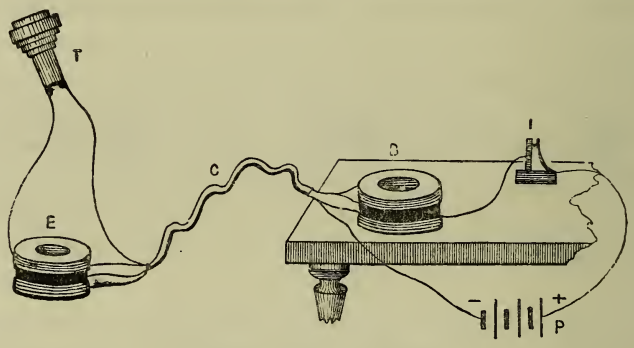


Fig. 490. — Balance d'induction.

pensant ainsi la différence des distances. Cette position de la bobine induite est le *zéro* de l'appareil, c'est le point à partir duquel on évalue les déplacements de la bobine induite *d*. Le mode d'emploi de l'appareil est d'ailleurs le même que pour l'autre disposition.

616. — La balance d'induction se présente aussi sous une autre forme qui répond à d'autres mesures. Considérons un circuit comprenant une pile P (fig. 490), un interrupteur I et deux bobines B et E aussi identiques que possible. Au-dessus de chacune de ces bobines plaçons une bobine induite ; ces bobines doivent également être identiques : réunissons-les entre elles et à un téléphone T de telle manière que les courants induits qui y prennent naissance à chaque instant tendent à parcourir le circuit en sens contraire. Si l'appareil a été construit avec la symétrie parfaite que nous avons supposée, les actions de ces courants se détrui-

sent à chaque instant, le téléphone ne fera entendre aucun son : on peut dire que la balance est en équilibre. Si cette condition n'était pas remplie immédiatement on chercherait à l'obtenir en faisant varier l'un des éléments qui déterminent l'intensité des courants induits. Pour y arriver, les diverses bobines sont plates et placées deux à deux l'une au-dessus de l'autre à quelque distance, chaque couple d'une bobine inductrice et de la bobine induite étant assez éloigné de l'autre couple pour qu'il ne puisse y avoir d'action de l'un à l'autre. Le réglage se fait alors en faisant varier la distance des bobines dans l'un ou dans l'autre couple.

Lorsque la balance est en équilibre, le téléphone silencieux par conséquent, il suffit de l'approche d'un morceau de métal dans le voisinage de l'un des couples de bobine pour détruire l'équilibre de telle sorte que le téléphone produit immédiatement un son; la hauteur du son est liée naturellement à la rapidité des interruptions, mais l'intensité dépend de la position, du poids et de la nature du métal que l'on approche ; le maximum d'effet se produit lorsque le métal est placé à l'intérieur de la bobine inductrice. Cette propriété a été appliquée pour s'assurer si la balle qu'avait reçue le président Garfield était restée dans la blessure; à cette occasion MM. Hughes et Graham Bell étudièrent les meilleures dispositions de détail qu'il convenait de donner à l'appareil, sans que, par suite de diverses circonstances, il pût être utilisé aussi fructueusement qu'on pouvait l'espérer.

Si, lorsque la balance est en équilibre, on vient à introduire dans les bobines deux morceaux de métal identiques et placés de la même façon, il est clair que l'équilibre ne sera pas troublé et que le téléphone ne fera entendre aucun bruit. Il n'en sera pas de même s'il existe une différence même légère entre les deux morceaux de métal : c'est ainsi que deux pièces de métal présentant entre elles une très minime différence de poids font entendre un son ; il suffit même qu'elles présentent une très faible différence dans la proportion des métaux constituants pour que, à poids égal, il se produise un son dans le téléphone. On conçoit comment cette propriété peut être utilisée directement si l'on a, à l'avance, une série de pièces étalons ayant des poids et des compositions variées et parfaitement communs. Étant donnée une pièce soumise à l'essai, on la place dans l'une des bobines et on cherche quelle pièce il convient de mettre de l'autre côté pour éteindre le bruit qu'avait naître l'introduction de la première pièce. On arrive ainsi à des résultats très précis.

Mais on peut opérer autrement que par la comparaison directe, ainsi que tout d'abord l'a indiqué Hughes; pour cela, il faut joindre le sonomètre à la balance proprement dite et disposer un commutateur qui puisse envoyer le courant de la pile alternativement dans l'un et dans l'autre de ces appareils; le circuit qui contient le téléphone comprend à la fois les bobines induites de la balance et du sonomètre; mais bien entendu, un seul système fonctionne à un moment donné, puisque le courant ne passe qu'alternativement dans les deux systèmes de bobines inductrices. Étant alors placée une pièce dans l'une des bobines, on entend un son d'une intensité déterminée et on cherche quelle position il faut donner à la bobine inductrice du sonomètre pour que cet appareil donne le son de même intensité; la comparaison est d'ailleurs très facile puisque le courant passe successivement d'un appareil à l'autre, l'identité d'intensité est obtenue lorsqu'on ne perçoit aucune variation au moment où l'on tourne le commutateur. Pour chaque nature de pièce et pour chaque poids on note la position de la bobine induite, position caractéristique; lorsqu'on aura à opérer sur une pièce inconnue, on cherchera la position de la bobine inductrice qui produise le même son et en se reportant à un tableau précédemment obtenu par comparaison directe, on pourra déduire le poids et la nature de la pièce étudiée. L'opération se fait ainsi plus rapidement que par la comparaison directe, mais elle exige naturellement une graduation préalable.

617. Systèmes de correspondance téléphonique. — Le téléphone peut être employé dans un certain nombre de cas, comme nous en donnerons des exemples; mais c'est principalement pour la transmission de la parole qu'il est utilisé.

La communication par téléphone entre deux points exige, au minimum, deux téléphones dans le genre du téléphone Bell réunis par un fil et reliés d'autre part à la terre ou, mieux, réunis par un double fil, si la ligne se trouve dans le voisinage d'une autre ligne télégraphique ou téléphonique. Dans ce cas chaque expérimentateur peut être parleur et auditeur mais successivement.

Une disposition préférable consiste à avoir deux téléphones à chaque station installés sur la même ligne; chaque personne ayant un téléphone à l'oreille et un autre devant la bouche peut alors causer et écouter en même temps comme s'il s'agissait d'une conversation directe. Ajoutons que, s'il s'agit seulement d'écouter, on peut employer simultanément les deux appareils placés aux oreilles de manière à avoir l'audition binauriculaire.

Une communication téléphonique comprend deux appareils qui sont le plus souvent un microphone transmetteur et un téléphone récepteur. Si la distance entre les deux appareils n'est pas grande, les deux appareils sont reliés directement entre eux et avec la pile; mais si la distance est grande, cette disposition est insuffisante, parce que la résistance totale augmente tandis que les variations d'intensité du courant, qui mettent le récepteur en action, diminuent.

Pour éviter cet inconvénient, on fait usage d'une bobine d'induction qui sert d'intermédiaire. Le microphone transmetteur est dans un circuit limité peu résistant qui comprend en outre la pile et le fil inducteur d'une bobine d'induction. Un autre circuit comprend le fil induit et le téléphone récepteur ; sa résistance, qui dépend de la distance des deux stations, n'a qu'une influence indirecte et peu notable sur le courant inducteur, d'une part. D'autre part, on peut compenser l'action de cette résistance en faisant varier convenablement le nombre des spires du fil induit de la bobine et du fil du récepteur, ce nombre de spires, duquel dépend la force électromotrice au départ et l'action magnétique dans le récepteur, devant être d'autant plus considérable que la ligne est plus longue, et par suite plus résistante.

Ajoutons que l'emploi de bobines d'induction a permis de résoudre un certain nombre de problèmes qui se posent dans les applications de la téléphonie et dans le détail desquels nous ne pouvons entrer.

En réalité, dans la pratique il faut satisfaire, en outre, à d'autres conditions; il faut en effet que de chaque station on puisse appeler l'attention des personnes situées à l'autre station afin de pouvoir entamer la conversation. Bien que quelques téléphones permettent de produire à la réception des sons présentant une certaine intensité (comme le téléphone Gower disposé spécialement à cet effet), en général on ne peut se servir des appareils téléphoniques eux-mêmes. La solution la plus simple consiste à joindre à chaque station une sonnerie et une pile : les appareils sont disposés de telle sorte que, au repos, les téléphones sont hors circuit tandis que les sonneries et les piles sont reliées aux fils de ligne, d'où résulte qu'en appuyant sur un bouton à une station on met en mouvement la sonnerie de l'autre station. Lorsque après un appel de la station A par exemple, la station B a répondu par une sonnerie à l'aide d'un commutateur quelconque, on rompt les communications des sonneries avec la ligne et on relie celle-ci aux téléphones : la conversation peut alors s'établir.

Mais, dans ce cas, l'emploi d'une pile étant nécessaire, il est préférable d'employer comme transmetteur, non un téléphone magnétique, mais un microphone qui donne des sons plus distincts. Il

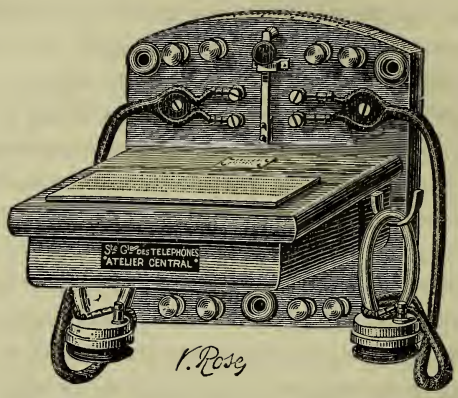


Fig. 491. — Poste de la Société générale des téléphone.

existe des appareils très commodément disposés pour la pratique ; nous décrirons un modèle disposé par la Compagnie des téléphones à Paris.

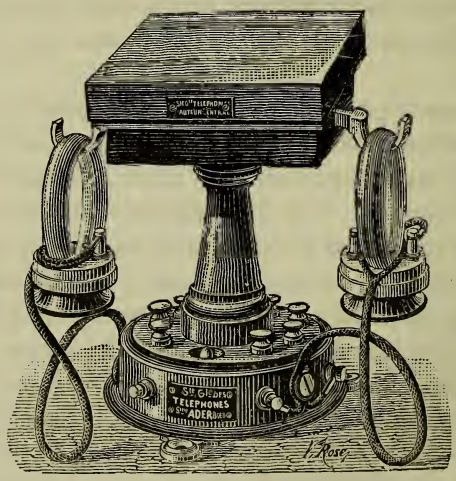


Fig. 492. — Poste de la Société générale des téléphones.

618. — L'appareil comprend un microphone Ader en forme de pupitre fixé au mur (fig. 491) ou monté sur un pied (fig. 492); à la planchette qui sert de support ou au pied se trouvent des bornes

auxquelles aboutissent les différents fils. Sur le côté sont les points d'attache de conducteurs souples qui sont reliés d'autre part à deux téléphones qui servent à l'audition binauriculaire. Lorsque l'appareil ne fonctionne pas, ces téléphones sont suspendus à des crochets qui se trouvent de chaque côté. L'un de ces crochets D (fig. 493) est susceptible de se mouvoir; lorsque le téléphone y est suspendu, il s'abaisse par l'action de ce poids, et, à l'intérieur ce mouvement, par une disposition aisée à concevoir met hors circuit le microphone M et les téléphones *tt'* et met au contraire la sonnerie S dans le circuit LAREKQST; lorsque l'on saisit le téléphone pour une conversation (fig. 494), le crochet D remonte sous

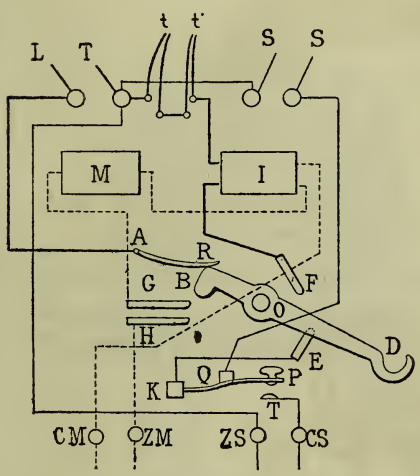


Fig. 493.

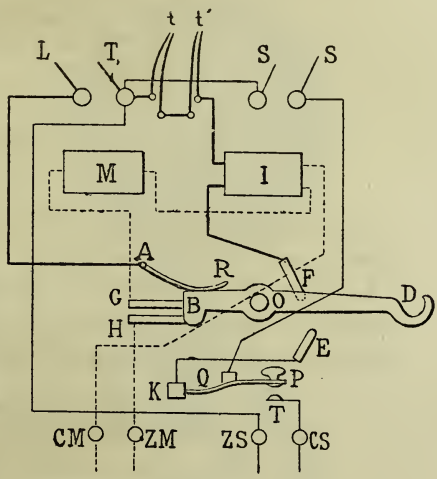


Fig. 494.

l'action d'un ressort R et change les communications : la sonnerie S est mise hors circuit, tandis que le microphone et les téléphones se trouvent prêts à fonctionner : le microphone transmetteur M est dans le circuit local CIMGBHZ et peut mettre en action la bobine d'induction I, tandis que d'autre part s'établit l'autre circuit, comprenant la ligne, le fil induit de la bobine et les téléphones, circuit formé par LARFI*tt'*T.

Ajoutons enfin qu'il y a en outre un bouton P (fig. 493) qui, lorsque l'appareil est en repos, ferme le circuit et provoque la sonnerie à l'autre station.

Dans les liaisons à établir entre les deux postes et les deux piles il faut tenir compte de ce que, en général, le courant destiné à actionner la sonnerie doit être plus énergique que celui qui doit

servir à la transmission téléphonique, de telle sorte qu'il faut employer un nombre d'éléments differents pour l'un et l'autre usage.

On fait usage le plus souvent d'éléments Leclanché, trois éléments suffisent pour la transmission; le nombre nécessaire pour la sonnerie varie avec la distance.

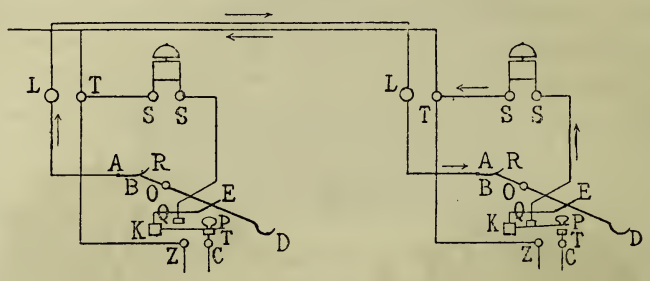


Fig. 495.

Les figures schématiques 495 et 496 permettent de suivre aisément la marche des courants.

La figure 495 représente le circuit des sonneries des deux stations lorsque les appareils sont dans la position du repos : on reconnaît aisément que si l'on presse à l'une des stations sur un des boutons P,

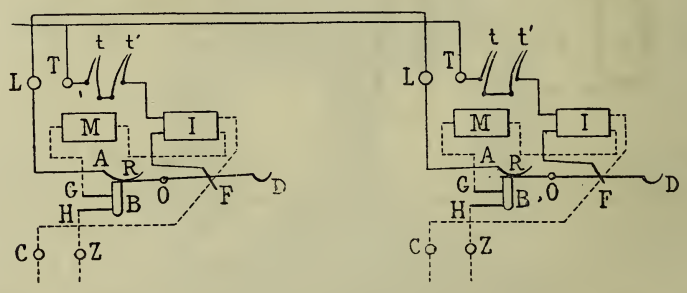


Fig. 496.

la sonnerie de l'autre station entre en action. La figure 496 correspond au cas où la conversation est établie; on voit alors les deux circuits locaux (en lignes ponctuées) comprenant la pile, le microphone transmetteur et le fil inducteur de la bobine I, et le circuit général réunissent les deux stations et comprenant les fils induits des bobines et les téléphones

La Société générale des téléphones emploie également des appareils plus ou moins semblables, mais dans lesquels le transmetteur Berthon est substitué au microphone Ader. Dans certains modèles (fig. 497) la disposition générale ne diffère en rien; pour de petites distances on a un modèle simplifié (fig. 498) dans lequel la bobine d'induction est supprimée et où l'audition se fait à l'aide d'un seul téléphone.

619. — L'importance réelle, sociale peut-on dire, du téléphone consiste dans la possibilité d'établir un système permettant la com-

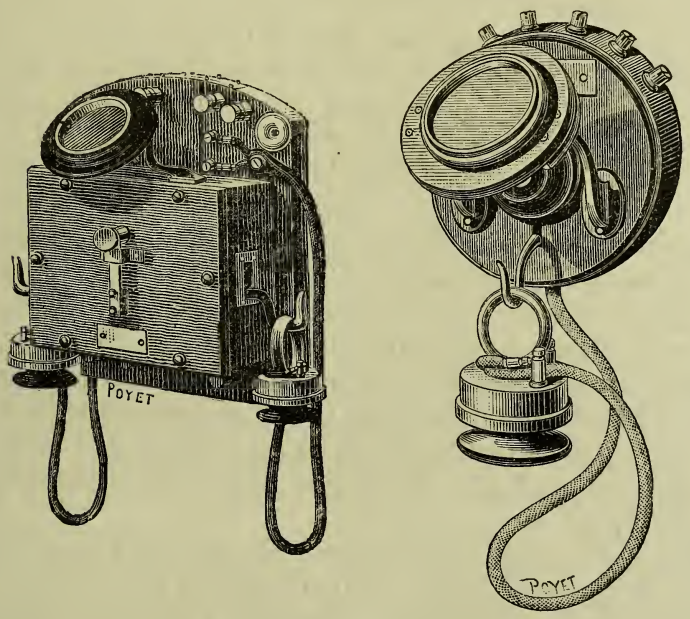


Fig. 497 et 498. — Nouveaux appareils de la Société générale des téléphones. (Transmetteur Berthon.)

munication directe entre un grand nombre de personnes habitant les diverses parties d'une même ville ou habitant même des villes différentes. Occupons-nous d'abord du premier cas.

Il est à peu près impossible de songer à unir deux à deux toutes les personnes qui, possédant un téléphone, veulent pouvoir entrer en communication avec les autres personnes ayant également un téléphone : s'il y a n personnes dans ce cas, il faudrait que chaque appareil pût être relié à chacun des $n - 1$ autres. Non seulement chaque appareil devrait être muni d'un commutateur très compliqué dès que le nombre n serait un peu grand (à Paris il dépasse

4000), de plus le nombre des fils nécessaires serait très grand[1] : cette solution eût été irréalisable.

La difficulté a été levée par l'emploi des *bureaux centraux*. Considérons le cas où le nombre des appareils à relier n'étant pas très grand il suffit d'un seul bureau central ; ce cas se présente dans les établissements ou usines où il existe des appareils disposés en divers points, il peut également se rencontrer dans des villes où le nombre des *abonnés* ayant un téléphone n'est pas très considérable.

Lorsque ces conditions se présentent, chaque appareil est relié par un fil (en réalité, presque exclusivement un double fil) au bureau central, de telle sorte que le nombre des fils est seulement égal au nombre des appareils. Dans le bureau central, à l'aide de dispositions spéciales dont nous indiquerons le détail plus loin, on peut réunir deux quelconques de ces fils et établir ainsi une communication directe entre les appareils correspondants.

Il va sans dire que des dispositions particulières doivent être prises : il faut que l'abonné A par exemple puisse, par un signal déterminé, prévenir le bureau central qu'il désire une communication ; il faut qu'il puisse indiquer à quel abonné il veut parler, à B par exemple ; il faut que le bureau central puisse appeler B, puis, prévenant A, établir la communication entre A et B. Il faut enfin que lorsque la conversation sera terminée, ces abonnés puissent prévenir le bureau central qui remet toutes les communications à l'état de repos et soit préparé à recevoir un nouvel appel de A ou de B ou à mettre l'un ou l'autre en relation avec un autre abonné qui le demanderait.

620. — Si le nombre des abonnés est très grand et que les distances soient considérables, comme il arrive à Paris, l'emploi d'un bureau central est insuffisant : outre qu'il y arriverait un nombre de fils très grands, ce qui rendrait le service peu aisé, les fils venant des points éloignés auraient une grande longueur et seraient fort coûteux. On a alors divisé la ville en un certain nombre de régions ayant chacune un bureau central, auquel correspondent tous les abonnés de la région ; de plus tous les bureaux centraux communiquent entre eux.

Comment alors vont s'établir les communications ? Deux cas peuvent se présenter :

1° L'abonné A veut causer avec l'abonné B qui est dans la même

1. Pour n appareils ainsi reliés, il eût fallu $\frac{n(n-1)}{2}$ fils, soit, pour Paris, 7 998 000.

région, qui correspond par conséquent avec le même bureau central. Les conditions sont les mêmes que dans le cas simple étudié plus haut, les opérations à exécuter seront donc les mêmes, il n'y a pas lieu de s'y arrêter.

2° L'abonné A correspond au bureau X tandis que l'abonné B est relié au bureau Y ; aux opérations précédentes il en faudra évidemment joindre une autre : établir la communication entre les bureaux X et Y.

621. — Entrons maintenant dans quelques détails : nous prendrons pour exemple le système qui a été adopté à Paris ; mais ce n'est pas la seule disposition que l'on puisse imaginer, d'autres ont été choisies dans d'autres villes.

Il existe à Paris dix bureaux (1886) qui doivent être reliés ensemble : on aurait pu les réunir par des conducteurs allant de chaque bureau à chacun des neuf autres, le nombre des conducteurs étant d'autant plus considérables entre deux bureaux déterminés que la communication entre les abonnés de ces bureaux sont plus fréquentes, ce que la pratique montre rapidement. En réalité on a préféré opérer autrement ; tous les conducteurs destinés à relier les bureaux entre eux passent par le bureau central principal de l'avenue de l'Opéra ; cette disposition qui allonge nécessairement les lignes reliant deux bureaux, présente l'avantage très réel au point de vue pratique de permettre de changer les liaisons des lignes et de régler exactement le nombre des lignes qui relient deux bureaux sur la fréquence des communications qui existent entre eux.

On comprend que si matériellement les fils qui réunissent deux bureaux passent par le bureau de l'avenue de l'Opéra, les deux bureaux n'en sont pas moins reliés directement au point de vue électrique de telle sorte que, dans les communications qui s'établissent entre eux, le bureau principal n'intervient en aucune façon. Au point de vue des transmissions téléphoniques, ce bureau ne comporte rien de particulier.

622. — Indiquons maintenant les dispositions qui permettent de réaliser les diverses opérations que nous avons énumérées précédemment : supposons d'abord qu'il s'agisse du cas le plus simple, d'établir une communication entre deux abonnés A et B reliés au même bureau.

Le téléphone de chaque abonné présente à peu près la disposition que nous avons indiquée plus haut (618). Les téléphones sont accrochés et mis hors circuit ainsi que le microphone ; l'abonné pousse le bouton d'appel et envoie dans la ligne un courant provenant de la

pile jointe à l'appareil. C'est ce courant qui doit produire un appel au courant central et indiquer quel est l'abonné qui fait cet appel.

Pour suivre les opérations qui vont se produire, il faut indiquer comment sont établies les communications au bureau central.

Les deux fils qui constituent le câble correspondant à l'appareil de chaque abonné aboutissent à un commutateur spécial désigné sous le nom de *Jack-knife*. Ce commutateur (fig. 499) se compose de deux lames métalliques C, D appliquées l'une et l'autre contre une lame isolante qui les sépare (sur le dessin schématique, les plaques sont supposées éloignées pour permettre de suivre plus aisément la marche des courants : en réalité elles sont très rapprochées. Sur ces dessins, les parties noires représentent les substances isolantes, les parties couvertes de hachures verticales

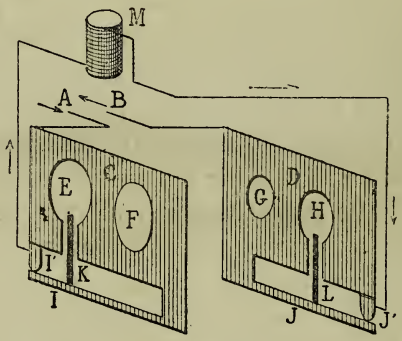


Fig. 499. — *Jack-knife.*

indiquent les lames conductrices fixes et celles couvertes de hachures obliques correspondent aux chevilles conductrices qui seront signalées).

Le fil A de l'abonné aboutit à la plaque métallique C qui porte inférieurement un ressort I qui vient buter contre un contact I′ ; la plaque est percée de deux ouvertures circulaires E et F ; une cheville isolante K fixée au ressort I pénètre dans l'ouverture E.

Le second fil B de l'abonné aboutit à la plaque métallique postérieure D qui présente également un ressort inférieur J butant contre un contact *isolé* J′ et est percée de deux ouvertures G et H situées en face de E et F mais d'un moindre diamètre. Une cheville isolante L fixée au ressort J pénètre dans l'ouverture H.

Ces diverses parties sont reliées à un électro-aimant M qui fait partie de l'*indicateur* ou *annonciateur* à l'aide des fils I′ M J′ comme

le montre la figure. Au-dessus de l'électro-aimant se trouve une palette reliée à un levier mobile autour d'un axe horizontal et dont l'extrémité opposée présente une partie recourbée. Au repos, cette partie maintient relevée une plaque verticale mobile autour d'un axe horizontal inférieur.

Avant d'entrer dans le détail du fonctionnement de ces diverses parties, il faut décrire les chevilles qui sont destinées à pénétrer dans les *Jack-knives*.

623. — Ces chevilles sont constituées par deux cylindres métalliques creux A, B (fig. 500) placés concentriquement et présentant des fentes latérales de manière que, pénétrant dans une ouverture un peu étroite ils fassent ressort et pressent contre les parois. Le cylindre intérieur A est plus long et dépasse le cylindre extérieur B d'une longueur égale à l'épaisseur de la plaque isolante et de la lame métallique postérieure : ils sont d'ailleurs maintenus dans une position invariable par une partie isolante C faisant poignée;

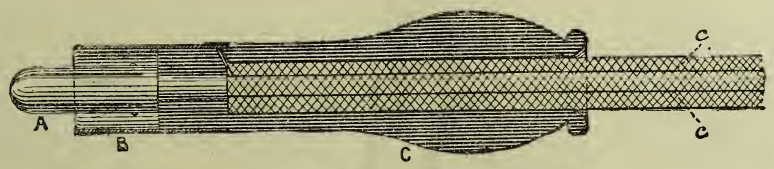


Fig. 500. — Cheville pour *Jack-knife*.

enfin chacun d'eux est relié à un fil métallique ; ces deux fils isolés sont réunis en un câble de $1^m,50$ de longueur environ et vont aboutir soit à une cheville analogue, soit à un système de téléphone destiné à servir aux employés du bureau.

L'appareil étant au repos, lorsqu'un abonné fait un appel, il ferme le circuit en pressant sur le bouton d'appel et envoie dans la ligne le courant de sa pile ; l'électro-aimant M devient actif, la palette est attirée et l'extrémité opposée du levier se soulève, ce qui laisse tomber la plaque qui bascule en démasquant une plaque qui porte le nom ou le numéro de l'abonné. En même temps cette plaque vient buter sur un bouton métallique et ferme le circuit d'une pile locale qui met en jeu une sonnerie ; l'employée est avertie par le bruit qu'un abonné appelle et elle voit immédiatement le numéro ou le nom de la personne qui appelle. L'indicateur fait ainsi fonction de relais.

L'employée ainsi prévenue (à Paris ce sont des jeunes filles qui

font le service) relève l'indicateur et introduit dans le trou de droite du *Jack-knife* une cheville qui aboutit d'autre part à son téléphone. La cheville en pénétrant ainsi abaisse la pièce L, ce qui écarte le ressort J et met l'indicateur hors circuit; de plus, par le cylindre intérieur qui pénètre dans l'ouverture H et par le cylindre extérieur qui entre dans l'ouverture F, la communication se trouve établie entre l'appareil de l'abonné et le téléphone de l'employée.

Celui-ci comprend un transmetteur microphonique (système Berthon, par exemple) et un téléphone récepteur, montés ensemble de manière à être placés simultanément devant la bouche et devant

Fig. 501.

l'oreille de l'employée (fig. 501). L'employée envoie un courant dans le circuit ce qui met en action la sonnerie de l'abonné; celui-ci ainsi averti qu'il a été entendu prend les téléphones et par là même introduit le microphone transmetteur dans le circuit, l'employée en fait autant et la conversation peut s'établir; l'abonné indique alors avec qui il veut communiquer.

L'employée enlève alors la cheville et va la placer dans l'ouverture de droite du *Jack-knife* de l'abonné qui doit être appelé; le ucorant qu'elle envoie met la sonnerie en action; l'abonné averti prend les téléphones et indique par un signal convenu (*Hallo*) qu'il écoute; l'employée lui fait savoir avec qui il a à communiquer. Elle

enlève alors la cheville de son appareil et en introduit une autre dans l'ouverture de gauche; cette cheville correspond par un câble à une cheville analogue qui est introduite dans l'ouverture de droite du *Jack-knife* de l'appelant. En suivant la marche des courants (fig. 502), on voit que l'indicateur de l'appelant est hors circuit, et que le courant arrivant par A, traverse la cheville en F arrive à la cheville en E_1, puis par la plaque C_1, est conduit au fil A_1 qui le conduit à l'appareil de l'abonné appelé. Le courant revenant par B_1, arrive à la plaque D_1, et par G_1, revient au câble, arrive en H, puis par la plaque D et le fil B retourne à l'appareil de l'appelé. Le circuit est donc complet et la conversation peut s'établir directement.

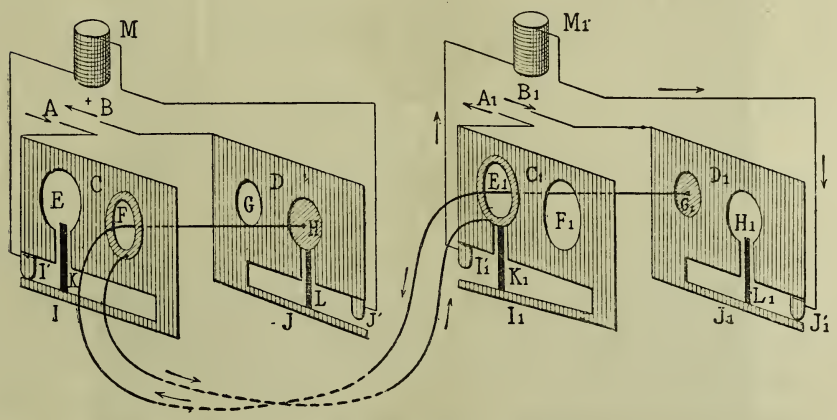


Fig. 502. — *Jack-knives* pendant une communication.

Il importe de remarquer que dans le *Jack-knife* de droite l'indicateur est en dérivation (aussi la lame I est-elle inutile pour les appareils ainsi disposés; mais elle est nécessaire dans d'autres dispositions que nous croyons inutile de décrire); cette dérivation est utilisée pour le *rappel au bureau*, c'est-à-dire pour prévenir le bureau que la conversation est terminée. A cet effet, à l'un des appareils communicants, on pousse le bouton d'appel, ce qui envoie dans la ligne le courant de la pile complète; le courant dérivé qui passe dans l'indicateur est suffisant pour faire fonctionner l'électro-aimant, la plaque tombe et la sonnerie fonctionne. L'employée avertie enlève les chevilles et relève la plaque de l'indicateur ce qui ramène les deux *Jack-knives* au repos et rend possible un nouvel appel des deux appareils. Lorsque les deux abonnés qui doivent commu-

niquer ne correspondent pas au même bureau, il y a une opération supplémentaire. L'abonné A ayant appelé le bureau X et l'ayant prévenu qu'il veut parler à l'abonné B appartenant au bureau Y, il faut que le bureau X appelle le bureau Y puis mette le *Jack-knife* de A en communication avec un câble unissant X à Y; le bureau appelle

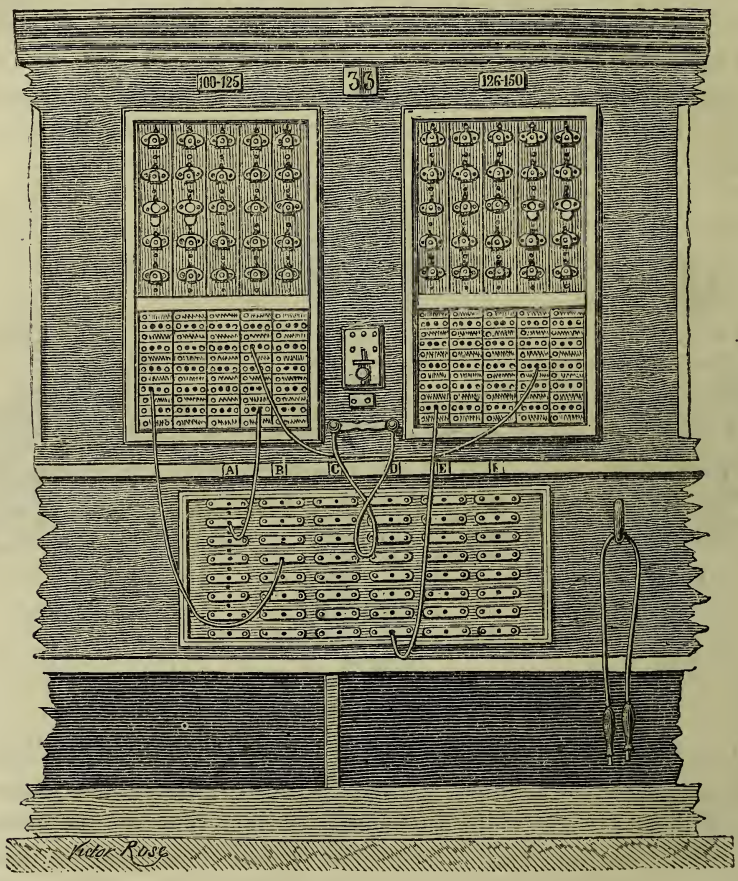


Fig. 503. — Disposition d'un panneau dans un bureau central.

l'abonné B et quand il a répondu établit une communication entre ce câble et le *Jack-knife* de B; les appareils de A et de B sont alors reliés directement et la conversation peut s'établir. Lorsqu'elle cesse, et qu'on pousse sur l'un des boutons d'appel, l'indicateur tombe; on rompt alors les communications.

624. — Donnons quelques détails complémentaires qui pour-

raient d'ailleurs être modifiés suivant les circonstances sans rien changer à la manière dont agissent les courants.

Dans un bureau les indicateurs sont rangées par série de 25 et sur un tableau portant des numéros et les *Jack-knives* sont rangés d'une manière analogue dans un tableau situé au-dessous (fig. 503). Le nombre de ces tableaux dépend de l'importance du bureau, c'est-à-dire du nombre des abonnés correspondants.

Lorsque deux abonnés de ce bureau veulent correspondre, on établit les communications comme nous l'avons dit, à l'aide d'un câble à deux chevilles, lorsqu'ils appartiennent au même tableau ou au moins à deux tableaux voisins; mais si les tableaux sont plus éloignés, on ne peut opérer ainsi directement, car il faudrait employer des câbles trop longs. Mais on a établi, sur des rangées spéciales des commutateurs qui sont reliés à des commutateurs de divers autres tableaux; des couleurs distinctes permettent de se retrouver aisément. Si donc on veut relier deux *Jack-knives* appartenant à des tableaux éloignés, on les relie respectivement à deux de ces commutateurs se correspondant.

C'est également par des commutateurs spéciaux placés inférieurement qu'on établit les communications de bureau à bureau.

Les *Jack-knives* qui servent pour ces communications ont une forme plus simple que celle que nous avons décrite.

On conçoit que les correspondances entre les abonnés ne se répartissent pas d'une manière quelconque et que les relations soient plus fréquentes dans certains groupes; il y a évidemment intérêt à rapprocher le plus possible les *Jack-knives* des abonnés qui sont le plus fréquemment en communication. Aussi, à cet égard peut-il être avantageux de pouvoir déplacer suivant les besoins tel ou tel abonné : on ne saurait songer, à chaque changement jugé nécessaire, à déplacer le câble de l'abonné pour l'amener d'un *Jack-knife* à un autre : il y aurait un enchevêtrement de câbles qui deviendrait bientôt inextricable. En réalité, les câbles qui aboutissent aux *Jack-knives* ne sont jamais déplacés; ils se terminent d'autre part à une *rosace*, commutateur particulier dont nous avons parlé (551). Leurs extrémités sont fixées à des bornes rangées sur le bord d'une ouverture circulaire pratiquée dans un panneau vertical : à ces bornes aboutissent, d'autre part les fils des câbles des abonnés. Ceux-ci arrivent par la périphérie, tandis que les câbles venant des *Jack-knives* sont réunis en un faisceau unique jusqu'en un point situé derrière la rosace et au niveau du centre : c'est là seulement qu'ils se séparent pour se rendre aux bornes, constituant

ainsi une sorte de cône creux. On conçoit qu'il soit facile d'interéchanger deux câbles quelconques, puisqu'ils ont tous la même longueur, représentant les génératrices d'un cône de révolution.

Au bureau de l'Opéra, il y a quatre rosaces semblables placées aux quatre faces d'une sorte de guérite carrée au centre de laquelle arrivent tous les fils venant du bureau.

625. Télégraphie et téléphonie simultanées. — L'établissement des conducteurs constitue pour la télégraphie et la téléphonie une dépense notable ; aussi est-il d'un intérêt très réel de pouvoir utiliser le mieux possible les lignes existantes : de là l'avantage des systèmes de télégraphes multiples dont l'emploi se généralise, de là l'importance capitale de l'invention faite par M. Van Rysselberghe d'un moyen de transmettre par les mêmes fils les dépêches télégraphiques et les conversations téléphoniques sans que ces diverses transmissions se gênent en aucune façon. Cette invention était nécessaire pour permettre d'établir les communications téléphoniques de ville à ville, sans que le prix d'établissement soit grevé de la dépense considérable de l'installation d'une ligne double.

L'invention que M. Van Rysselberghe a brevetée en 1882 et qui a maintenant reçu la sanction de la pratique repose sur un fait d'observation : nous avons dit que le téléphone entre en action sous l'influence de courants interrompus. Cette condition est nécessaire en effet, elle n'est pas suffisante, il faut que les émissions et les extinctions de courants soient brusques. Si les courants commencent et finissent graduellement (quoique dans un temps très court, naturellement) le téléphone ne produit aucun son perceptible à l'oreille; M. Van Rysselberghe, qui a découvert ce principe, a pensé qu'il était possible d'installer les appareils téléphoniques sur les fils servant aux appareils télégraphiques en disposant ceux-ci de manière que les courants qu'ils émettent soient graduels, qu'ils ne commencent ni ne finissent brusquement; dans ces conditions, on n'entend aucun bruit dans les téléphones.

Il va sans dire que les émissions et interruptions graduées doivent se produire dans un temps très court pour que la transmission télégraphique ne soit pas trop retardée. Quant aux transmissions téléphoniques, elles ne sauraient causer de trouble dans le fonctionnement des appareils télégraphiques ; les courants qu'elles occasionnent sont très faibles et leur caractère spécial de courants ondulatoires de très courte période les rend incapables d'agir sur les récepteurs télégraphiques. M. Van Rysselberghe a satisfait à la condition théorique que nous venons d'indiquer en intercalant dans

le circuit de petits électro-aimants graduateurs, ou en mettant sur la ligne des condensateurs faisant office de dérivateurs, et mieux encore en réunissant ces deux moyens.

Une autre difficulté consiste dans la nécessité d'accoupler symétriquement les fils servant à la téléphonie de manière à éviter les effets d'inductions des fils voisins.

626. — La solution pratique du problème de la simultanéité des transmissions télégraphiques et téléphoniques sur une même ligne exige l'application de dispositions diverses qui permettent de séparer entièrement les deux services ; nous indiquerons sommairement les moyens appliqués en Belgique.

Pour obtenir les courants gradués circulant dans les fils sous l'influence des appareils téléphoniques, M. Van Rysselberghe emploie deux électro-aimants graduateurs E_1, E_2 de 500 ohms chacun et un

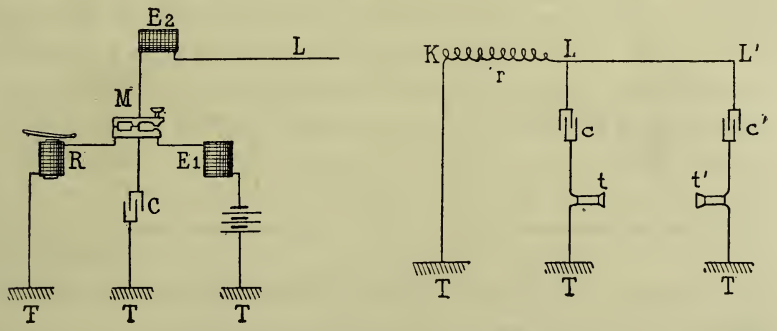


Fig. 504 et 505. — Téléphonie et télégraphie simultanées.

condensateur C de 2 microfarads; voici la disposition d'un bureau télégraphique dans ces conditions (fig. 504) :

M est le manipulateur et R le récepteur, d'un système quelconque d'ailleurs.

L'un des électro-aimants E_1 est placé entre la pile et le manipulateur ; l'autre E_2 après le manipulateur sur la ligne; enfin le condensateur C est sur une dérivation entre la ligne et la terre.

Bien entendu le bureau placé à l'extrémité de la ligne présente les dispositions analogues.

Les téléphones sont reliés à la ligne entre les bureaux télégraphiques : ils sont disposés d'une manière particulière (fig. 505), étant séparés de la ligne par un condensateur C et se trouvant mis en communication avec la terre d'autre part. M. Van Rysselberghe a reconnu que, avec cette disposition, les communications télépho-

niques avaient lieu dans les mêmes conditions, que le circuit se continuât jusqu'à la terre ou qu'il y eût interruption, pourvu que la résistance de la partie LKT fût au moins de 500 ohms, ce qui est précisément le cas. Alors les communications téléphoniques ont lieu à travers la ligne L L′, soit que le circuit soit ouvert entre K et T, soit qu'il se trouve fermé, soit que le courant passe, soit qu'il ne passe pas; elles ne sont donc pas influencées par les manœuvres du manipulateur ni par les mouvements du récepteur de la station qui est placée entre K et T, c'est-à-dire que les communications téléphoniques sont absolument indépendantes de la transmission télégraphique.

La disposition précédente ne peut pas être simplement employée, parce que la transmission téléphonique qui aurait lieu dans le fil

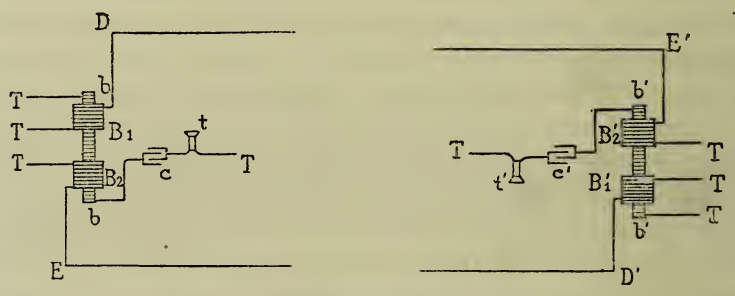


Fig. 506. — Communications entre deux bureaux.

de ligne agirait par induction sur les fils voisins et gênerait les transmissions téléphoniques qui utiliseraient ces fils (il va sans dire que les transmissions télégraphiques, ne produisant aucun effet dans les téléphones reliés au même fil, ne peuvent non plus agir sur les fils voisins). Il était donc nécessaire d'adopter une disposition qui produisît un effet analogue à celui du fil de retour qui est employé souvent dans les transmissions téléphoniques.

Aussi, en réalité, le téléphone n'est pas relié directement à la ligne par l'intermédiaire d'un condensateur, mais il est en relation indirecte avec deux lignes par l'intermédiaire de deux condensateurs et d'une bobine d'induction (fig. 506).

Le fil de la ligne E′ D arrive à une bobine B_1 et de là se rend au télégraphe, puis à la terre; à l'intérieur de cette bobine est une bobine *bb* dont le fil communique d'une part à la terre et d'autre part à un condensateur *c* et au téléphone *t* qui lui-même est relié à la terre. Mais la bobine intérieure, qui est fort longue,

traverse une autre bobine B_2 placée d'une façon analogue à la première et reliée à une autre ligne ED′ et à la station télégraphique d'autre part; cette bobine est enroulée en sens contraire de la première. Lorsque le téléphone *t* agira comme transmetteur, la bobine *b* sera inductrice et fera naître dans les deux lignes des courants égaux et de sens contraires ; ces courants arrivant à l'autre station et traversant les bobines B_1', B_2' ajouteront leurs effets, puisqu'ils sont de sens contraire et traversent des bobines ayant des enroulements inverses; la bobine *b′b′* intérieure est alors induite sous la somme de ces deux actions et le téléphone fonctionne. Mais, sur la ligne, les deux fils DE′ et ED′ qui sont voisins ne peuvent agir par induction sur les fils voisins puisqu'ils sont parcourus par des courants de sens contraire.

On voit que dans le système que nous venons d'exposer sommairement les appareils téléphoniques n'ont à présenter aucune disposition spéciale, les modifications nécessaires portent toutes sur l'installation des bureaux télégraphiques.

Les expériences de transmission simultanée par le télégraphe et le téléphone ont eu lieu pour la première fois le 16 janvier 1882, entre Bruxelles et Anvers. Depuis, le système est entré dans la pratique en Belgique et les abonnés des villes qui possèdent des réseaux téléphoniques peuvent maintenant correspondre entre eux par téléphone.

Le système est applicable à de grandes distances : il a été essayé avec succès entre Paris et Bruxelles (335 kilomètres) le 16 mai 1882 ; un peu plus tard, le 9 juin de la même année, des essais réussirent également bien entre Bruxelles et Douvres. Il semble, par conséquent, que le problème est résolu d'une manière complète, non seulement en théorie, mais aussi au point de vue pratique.

CHAPITRE V

COMPTEURS, INDICATEURS, ENREGISTREURS, RÉGULATEURS

627. — La rapidité de transmission de l'électricité, la possibilité de produire à distance un mouvement sans aucune liaison rigide, de produire le mouvement même à de très grandes distances ont conduit à employer les courants pour produire l'enregistrement de phénomènes déterminés, toujours identiques à eux-mêmes. Le nombre des appareils imaginés dans ce but est considérable, il s'accroît chaque jour, en général, ces appareils ne présentent rien de bien particulier au point de vue des actions électriques : c'est toujours, au transmetteur, un appareil émettant un courant ou une série de courants de même sens ou alternés pour chaque action spéciale produite; au récepteur, un électro-aimant traversé par ces courants et agissant sur un contact de fer doux ou sur une armature polarisée pour produite directement un mouvement ou simplement un déclenchement. Les différences sont, presque exclusivement, on peut le dire, d'ordre mécanique; elles portent sur la manière dont le phénomène étudié aura pour effet de provoquer au transmetteur l'ouverture ou la fermeture d'un circuit, et au récepteur sur les procédés par lesquels l'action de l'électro-aimant mettra en mouvement une ou plusieurs sonneries, fera tourner une aiguille sur un cadran, ou provoquera par l'intermédiaire d'un style l'inscription d'un trait sur un cylindre enregistreur.

Nous choisirons quelques exemples variés, seulement pour donner une idée des résultats que l'on peut obtenir; nous classerons ces appareils d'après le but que l'on se propose d'atteindre, ce qui, au point de vue électrique, réunira des procédés très dissemblables; mais il serait très difficile d'établir une classification rationnelle.

A ces appareils nous en joindrons quelques autres qui s'y rattachent intimement; ce sont des régulateurs qui entrent en jeu pour une valeur donnée indiquée par l'enregistreur.

628. Horloges électriques. — Théoriquement la distribution de l'heure par l'électricité ne présente aucune difficulté; à une station centrale un régulateur, horloge dont la marche est aussi parfaite que possible, envoie un courant dans un ou plusieurs circuits à des instants déterminés, toutes les secondes, tous les quarts de minute ou toutes les minutes suivant les cas. Ces courants traversent des appareils placés dans le circuit et présentant une disposition plus ou moins analogue à celle du télégraphe à cadran, permettant de faire avancer une aiguille d'un angle déterminé pour chaque émission de courants.

Cette solution qui paraît la plus directe, la plus simple, présente en réalité des difficultés réelles; ces appareils doivent, en effet, marcher sans arrêt, sans relâche et sans surveillance; dans les transmissions télégraphiques, il y a à chaque station un agent qui, lorsqu'il s'aperçoit d'une erreur, d'un défaut de fonctionnement, arrête la transmission jusqu'à ce que les appareils soient remis en ordre : s'il n'en était pas ainsi, les erreurs seraient certainement nombreuses. Il ne peut rien y avoir de semblable pour les horloges électriques.

Si l'on joint à cela qu'il suffit de peu de chose, de l'oxydation d'un contact, de quelques grains de poussière pour arrêter le courant et empêcher le fonctionnement de l'appareil, on peut comprendre aisément que la transmission directe de l'heure ne fournit qu'une solution incomplète du problème.

D'autres solutions ont été données qui présentent dès l'abord un réel avantage en ce qu'elles comportent à chaque station une horloge ordinaire qui suffirait à donner directement l'heure, de telle sorte que, si, pour une cause quelconque, le courant vient à cesser, les diverses stations ne soient pas privées de l'indication de l'heure. L'électricité n'est alors employée qu'à amener une concordance plus ou moins parfaite entre la marche de chacune de ces horloges et la marche du régulateur central : tantôt les dispositions sont telles que le courant a pour effet d'amener à chaque battement un synchronisme à peu près absolu entre la marche du régulateur et celle de chaque horloge; tantôt, au contraire ces horloges restent absolument indépendantes du régulateur pendant un certain temps, pendant une heure ou un jour; mais, périodiquement, et quelles que soient les différences qui aient pu se produire, au bout de ce

temps, les horloges sont ramenées à l'heure précise indiquée par le régulateur. Ce dernier système moins précis que les précédents, naturellement, est en général suffisant dans la pratique; il présente l'avantage de n'exiger ni pile, ni réseau spécial et peut fonctionner en empruntant une ligne servant régulièrement à des communications télégraphiques sur laquelle la transmission est interrompue pendant un temps très court à chaque heure ou chaque jour.

Enfin, bien que, jusqu'à présent, il semble que la question soit moins intéressante, il y a lieu d'indiquer des horloges dans lesquelles l'électricité joue un autre rôle et est utilisée comme force motrice dans le but d'obtenir une régularité absolue à laquelle ne se prête pas d'une manière complète le mécanisme moteur des horloges ordinaires.

Nous donnerons un exemple de chacune de ces formes des applications de l'électricité à l'horlogerie.

629. Compteur électro-chronométrique de Mildé. — Dans un système quelconque de transmission de l'heure, il y a toujours à étudier séparément l'horloge régulatrice qui est le transmetteur et le compteur qui est le récepteur. Bien que, en général, chaque constructeur ait adopté une disposition spéciale pour l'une et pour l'autre, il n'y a pas dépendance absolue et, sauf de rares exceptions, un transmetteur quelconque pourrait actionner un récepteur quelconque.

Le système de M. Mildé est un des simples : l'émission de courant se fait par l'ancre d'échappement même. A cet effet l'axe de cette ancre A (fig. 507) est en communication avec la pile et ses pivots sont portés par des pièces métalliques incrustées dans des blocs d'ivoire, tandis que d'autre part la roue d'échappement, par l'intermédiaire même du mécanisme, est en rapport avec la ligne qui conduit le courant aux horloges. Le contact entre les levées de l'ancre et les dents de la roue qui a lieu à chaque oscillation ne produit pas la fermeture du circuit, parce que les levées L sont en pierre dure, isolante : mais l'ancre porte près de l'une de ces levées une petite palette de platine *b*, tandis qu'en un point la roue d'échappement présente une cheville d'or *l* contre laquelle à chaque tour vient buter la palette de platine ce qui produit la fermeture du circuit et amène l'émission d'un courant dans la ligne. Ce contact ne change rien aux conditions de fonctionnement de l'appareil régulateur, ce qui est essentiel, parce que la forme de la palette et de la cheville ont été choisies de manière à présenter les conditions même qui se produisent à chaque échappement d'une dent. D'autre part, le con-

tact qui a lieu par pression et par frottement paraît assez bien assuré et le frottement même a pour effet d'enlever les matières qui pourraient se déposer sur les surfaces métalliques.

Le compteur comprend une roue à rochet A (fig. 508) dont le mouvement entraîne celui d'une minuterie sur lequel il n'y a rien de particulier à dire, et un électro-aimant qui est traversé par le courant venant du régulateur. Devant cet électro-aimant, se trouve une palette de fer doux mobile CD autour du point C et portant un doigt à rochet EF; la palette est attirée lorsque le courant passe et le doigt pénétrant dans une dent fait avancer la roue ; un ressort antagoniste ramène la palette en arrière lorsque le courant cesse. (En réalité le doigt n'est pas porté directement par la palette, mais par

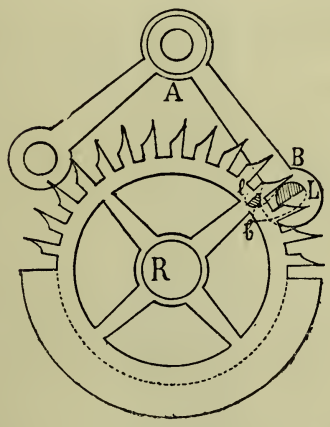


Fig. 507. — Transmetteur chronométrique Mildé.

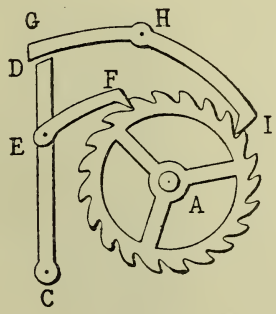


Fig. 508.

un levier qui est mû par la palette (fig. 509), afin d'amplifier le déplacement.) Un cliquet de sûreté mobile avec le doigt et qui vient se placer entre deux dents empêche le déplacement de dépasser la valeur correspondant à une dent. Un autre cliquet I (fig. 508) qui sert de cliquet de retenue et qui maintient la roue à la position qu'elle a prise par l'action du cliquet d'impulsion est mobile autour d'un pivot H et par un prolongement HG empêche le retour en arrière de la palette tant que ce cliquet n'a pas atteint sa position définitive, de telle sorte que tout mouvement commencé est nécessairement forcé de se terminer et que, par suite, tout passage du courant fait tourner la roue à rochet d'une dent exactement.

Le temps qui s'écoule entre deux émissions de courants, temps égal à celui de la rotation de la roue d'échappement dépend du

nombre de dents de cette roue et de la durée des oscillations du balancier. Il va sans dire que les roues de la minuterie du récepteur doivent être déterminées d'après ce temps.

630. Synchronisation des horloges de la ville de Paris. — L'administration municipale a établi à Paris un certain nombre d'horloges qui sont reliées à un régulateur placé à l'Observatoire et qui sont disposées de manière à marcher synchroniquement avec ce régulateur.

Le régulateur est une horloge de précision dans laquelle il y a deux points particuliers à considérer.

Comme malgré le soin apporté à la construction, cette horloge ne peut conserver une marche exacte d'une manière rigoureuse, on

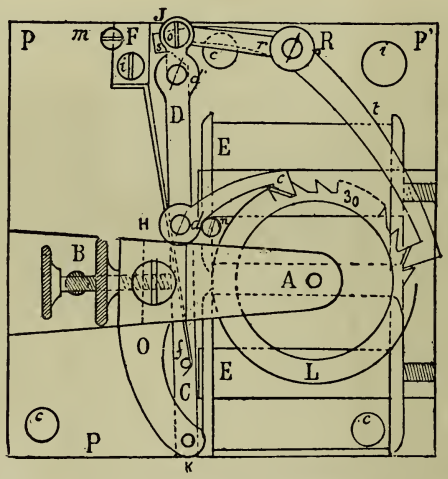


Fig. 509. — Horloge Mildé : récepteur. (*La Lumière électrique.*)

a employé une disposition qui permet sans l'arrêter de modifier sa marche ; cette disposition, sur laquelle nous n'avons pas à insister, consiste à placer dans une boîte fixée à la tige du pendule (fig. 510) des petits poids ou à les enlever à l'aide d'une pince, suivant que l'horloge avance ou retarde. Ces changements sont apportés chaque jour d'après les indications fournies par la comparaison avec les observations astronomiques ; nous n'insistons pas sur ce côté de la question qui n'a aucun rapport avec l'électricité.

L'émission d'un courant est obtenue à chaque seconde à l'aide de la disposition suivante :

La partie supérieure de la tige par laquelle le pendule est suspendu est conductrice ; elle porte de chaque côté un bras métallique

à l'extrémité duquel est une traverse horizontale sur laquelle sont fixées trois pointes de platine, à égales distances. A quelque distance du pendule et au niveau de cette traverse un support fixe porte un axe métallique autour duquel peuvent tourner séparément trois petites lames légères qui au repos s'appuient sur des vis qui permettent de régler absolument cette position ; lorsque le pendule oscille, les pointes de la traverse viennent soulever ces lames établissant ainsi un constant qui ferme le circuit. Comme ce contact se produit vers l'extrémité de l'oscillation, sa durée est petite; on

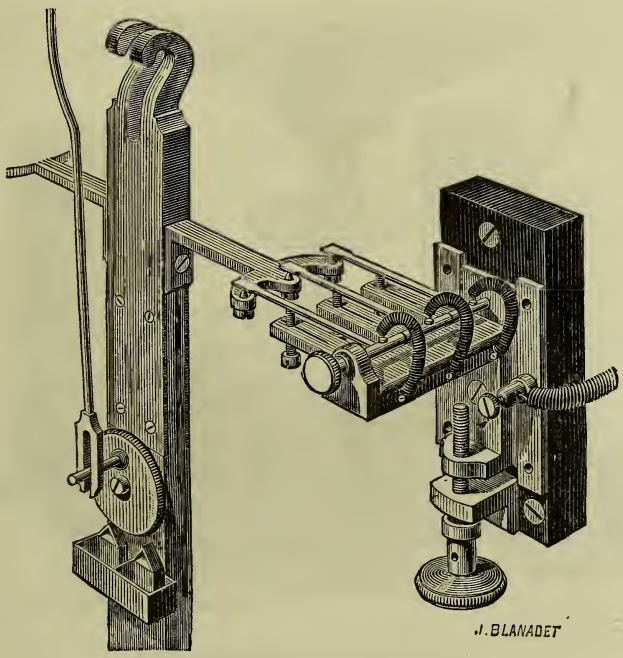


Fig. 510. — Horloge électrique Bréguet : régulateur.

peut d'ailleurs la faire varier entre certaines limites par l'action des vis de réglage.

Bien qu'une lame puisse suffire à établir le contact, on en a installé trois, afin de parer d'une part aux causes accidentelles qui pourraient se produire, comme la présence d'un grain de poussière qui se placerait entre la pointe et la lame ; avec trois lames, cet inconvénient est certainement évité. D'autre part, cette disposition permet de nettoyer les contacts sur ces lames sans interrompre la marche du système ; on peut, en effet, faire tourner une lame

individuellement de 180°, par exemple pour vérifier ou assurer le bon état de la pièce par où le contact a lieu, sans modifier en rien l'action des autres lames qui continuent à établir le passage du courant.

631. — Les horloges réceptrices sont des horloges dont la marche est très régulière, mais dont le balancier a été réglé de manière à faire l'oscillation en un temps un peu plus court que la seconde ; l'horloge, seule, avancerait donc, très peu, il est vrai ; sa liaison avec le régulateur de l'Observatoire a pour effet de lui

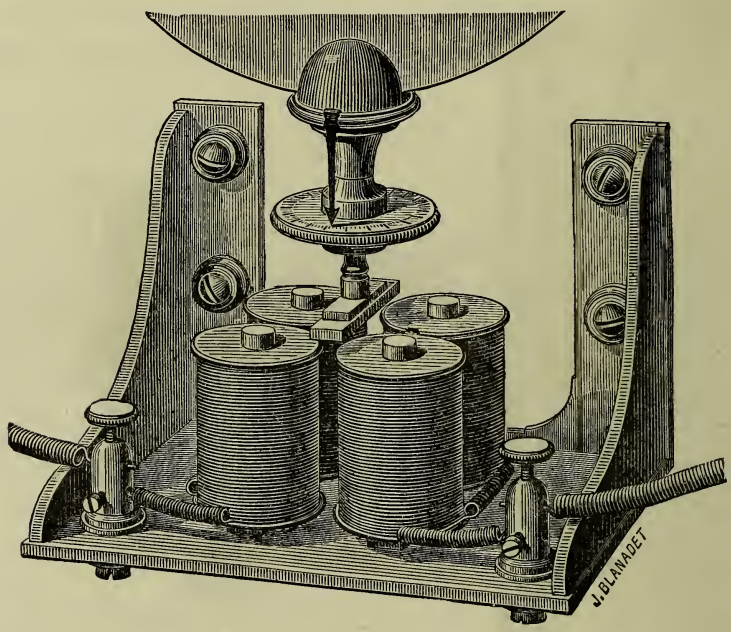


Fig. 511. — Balancier de l'horloge réceptrice.

donner une marche absolument synchrone à la marche de celui-ci.

Le balancier de cette horloge, qui est terminé à sa partie inférieure par une masse de fer doux (fig. 511), passe au-dessous de deux électro-aimants doubles placés symétriquement de part et d'autre de la verticale du point de suspension et qui sont dans le circuit dont fait partie le régulateur de l'Observatoire ; ces électro-aimants reçoivent donc un courant à chaque oscillation du balancier du régulateur. Ils agissent sur la masse de fer doux et exercent sur lui une action retardatrice qui ramène la durée de l'oscillation à être la même que celle du pendule régulateur.

Les horloges réceptrices doivent avoir une marche accélérée et l'on a admis comme règle que l'avance devait atteindre 20 secondes par jour; le battement de leur pendule devait donc être de $\frac{1}{4320}$ de seconde plus court que celui du pendule régulateur et c'est cette petite différence que l'action des électro-aimants compense à chaque oscillation. D'autre part, elles doivent marcher seules de manière à ne pas présenter une différence de marche de plus de deux secondes par jour, elles marcheraient donc avec une exactitude suffisante si le système électrique cessait de fonctionner pour une cause quelconque.

Les horloges qui fonctionnent à Paris par ce système sont au nombre de 15 réparties sur deux circuits métalliques complets

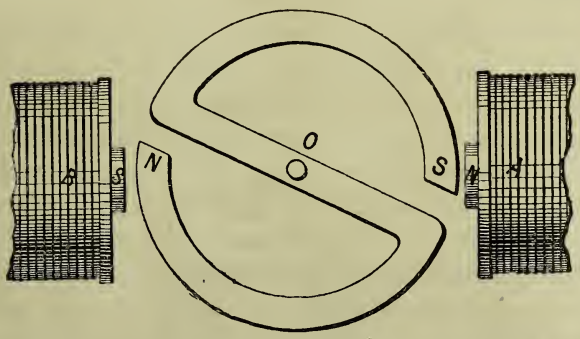


Fig. 512. — Horloge électrique de M. Thomas. (*La Lumière électrique.*)

aboutissant l'un et l'autre à l'Observatoire et dont les fils passent dans les égouts.

632. — Nous signalerons le principe de l'horloge de M. Thomas qui présente une particularité intéressante.

Le transmetteur est disposé de manière à agir toutes les trente secondes en envoyant dans le circuit des courants alternativement dans un sens et dans l'autre.

Le récepteur comprend essentiellement un aimant NS (fig. 512) en forme de S pouvant tourner dans son plan, autour de son centre O entre les deux pôles A B d'un électro-aimant qui sont diamétralement opposés : cet électro-aimant est traversé toutes les trente secondes par le courant émané du transmetteur, de telle sorte que ses pôles alterneront. L'appareil étant au repos, les pôles de l'aimant sont en face des noyaux de l'électro-aimant ; le premier courant a pour effet de donner à ces noyaux la même polarité qu'aux pôles qui

sont alors repoussés; l'aimant prend un mouvement de rotation qui s'arrête après un demi-tour parce que, alors, les pôles de l'aimant sont en face des pôles de nom contraire de l'électro-aimant, ce qui produit une attraction : une disposition spéciale, un taquet butant contre un petit ressort empêche l'aimant de dépasser beaucoup la position d'équilibre, où il reste jusqu'à ce que l'émission suivante, renversant les actions, reproduise le même effet. L'aimant exécutera donc une demi-révolution toutes les trente secondes. Il est relié à une vis sans fin qui tourne ainsi périodiquement et qui engrène avec une roue appartenant à une minuterie qui fait mouvoir les aiguilles des minutes et celles des heures : la vis faisant un tour par minute, il suffit que la roue correspondante ait soixante dents pour que l'aiguille des minutes puisse être fixée directement sur son axe.

633. Procédé de remise a l'heure. — Un procédé d'unification de l'heure, qui est fort pratique, consiste à laisser les horloges fonctionner d'une manière complètement indépendante du régulateur, laissant ainsi se produire des différences que l'on s'arrange pour être de peu d'importance, puis à des heures déterminées, une fois par jour, par exemple, l'horloge est reliée électriquement au régulateur et par des procédés divers ses aiguilles sont ramenées à la même position absolument que celles du régulateur : il y a *remise à l'heure;* la communication est de nouveau interrompue pour vingt-quatre heures, après quoi, la remise à l'heure s'effectuera de la même façon, de telle sorte que les erreurs ne peuvent jamais dépasser la limite qui a été fixée pour un jour.

Plusieurs procédés ont été employés, dans le détail desquels nous n'entrerons pas, comme par exemple d'envoyer à midi précis un courant qui a pour effet de séparer les aiguilles du rouage moteur et de les ramener toutes deux à la verticale; après quoi, l'horloge étant ainsi à midi, comme le régulateur, le courant cesse d'agir, les connexions mécaniques sont rétablies et l'horloge recommence à marcher de sa marche normale.

Dans ce cas, la remise à l'heure se produit, quelle qu'ait été la différence de marche par rapport au régulateur, avance ou retard. Dans d'autres systèmes, qui sont d'une application fort simple, on s'arrange pour que, normalement, l'horloge avance de quelques secondes par jour sur le régulateur. Un peu avant l'heure indiquée pour le réglage, un courant envoyé par ce régulateur rend immobile l'échappement sans arrêter le pendule qui continue à osciller, mais sans faire marcher les aiguilles ; puis à l'heure du réglage la

liaison est rétablie, mais l'avance de l'horloge a été corrigée par ce temps d'arrêt.

Pour que cette méthode puisse être appliquée aisément, il faut que la liaison entre l'échappement et le pendule se fasse d'une façon spéciale : la fourchette Duchemin est particulièrement commode. On sait que, dans les horloges, l'échappement tend à tourner d'une manière continue sous l'influence du moteur, poids ou ressort, mais que le mouvement est arrêté parce que les dents ou les chevilles d'une roue spéciale viennent buter contre une pièce qui n'en laisse échapper qu'une à chaque oscillation ; la fourchette est destinée à transmettre le mouvement d'oscillation du balancier à l'arbre qui porte cette pièce : c'est une tige fixée à la partie supérieure à cet arbre et présentant à sa partie inférieure une rainure

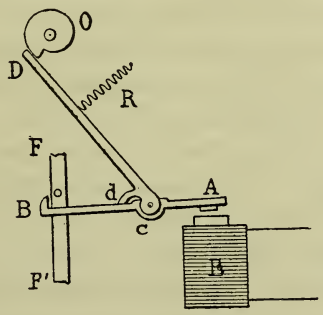


Fig. 513. — Remise à l'heure, système Henri Lepaute.

dans laquelle pénètre soit la tige du pendule (dans les horloges d'appartement) soit une cheville qui, en général, est placée sur l'axe du pendule. La fourchette Duchemin agit sur le côté de la tige du pendule, de telle sorte que lorsque celle-ci est au repos, verticale, la fourchette est inclinée ; on conçoit que si on l'incline, à partir de cette position d'un angle plus grand que celui qui mesure l'amplitude de l'oscillation du pendule, celui-ci oscillera seul, sans liaison avec l'échappement qui sera immobilisé ainsi que l'horloge même.

Cette fourchette FF′ (fig. 513) porte une cheville qui peut être en prise avec un doigt B qui forme l'extrémité d'un levier ; la fourchette sera immobilisée lorsque la cheville sera accrochée par le doigt, ce qui arrivera quand le levier basculera sous l'influence d'un courant envoyé par le régulateur et traversant l'électro-aimant E. Mais il faut que l'arrêt ne se produise que si l'horloge à régler est en

avance sur le régulateur; pour satisfaire à cette condition, voici la disposition qui a été adaptée par M. Henry Lepaute à des horloges du chemin de fer de l'Est qui sont remises à l'heure toutes les heures.

Un levier D s'appuie par une extrémité sur un limaçon monté sur l'axe O des minutes; par son autre extrémité, il agit sur le levier mobile A et s'oppose à son mouvement, ou le laisse se produire suivant la position qu'il prend. Le mouvement est libre quand l'extrémité D est dans la coche du limaçon, il est impossible quand elle est sur la partie faisant came. Or, à l'heure précise pour laquelle le réglage doit avoir lieu, cette came laisse échapper le levier qui tombe dans l'entaille.

Il est alors aisé de comprendre le fonctionnement de ce système : 30 secondes avant l'heure du réglage, le régulateur envoie dans l'électro-aimant de l'horloge un courant qui cessera à l'heure précise. Si l'horloge n'avance pas de 30 secondes, mais d'une quantité moindre, le levier D ne sera pas encore dans l'entaille. Le levier ne pourra pas basculer, le pendule continuera d'agir sur l'échappement ; quand l'horloge marquera l'heure du réglage, avec une avance sur le régulateur de 20, 15, 10... secondes, le levier D tombera dans l'entaille, le levier A basculera et la fourchette sera immobilisée sans que le pendule cesse d'osciller, mais sans que l'horloge marche ; lorsque, à l'heure précise, le régulateur cessera d'envoyer le courant, la fourchette sera rendue libre, oscillera avec le pendule et l'horloge marchera indiquant également l'heure à laquelle elle s'est arrêtée, c'est-à-dire l'heure précise.

Si, accidentellement, l'avance de l'horloge avait atteint ou dépassé 30 secondes, le levier D serait déjà dans l'entaille quand le courant parviendrait dans l'électro-aimant et aussitôt l'horloge s'arrêterait; son arrêt durerait 30 secondes et la différence, si elle était supérieure à cette valeur, ne serait pas annulée, elle serait seulement diminuée de 30 secondes, et continuerait à diminuer l'heure suivante.

634. Horloges électriques. — Les horloges électriques proprement dites ne rentrent pas dans les classes des appareils dont nous venons de parler et pourraient plutôt être décrits avec les machines mues par l'électricité. Mais outre que leur principe diffère absolument de celui des moteurs dont nous avons parlé, il est plus naturel de les ranger avec les appareils ayant la même destination générale.

Les horloges électriques sont des horloges fonctionnant sans moteur mécanique, poids ou ressort, et dans lesquelles le travail

nécessaire à produire le mouvement et à vaincre le frottement est fournie par une pile électrique.

On a construit des horloges électriques dans deux buts différents : tantôt on se propose d'obtenir des appareils simplifiés et qu'il n'y ait pas besoin de remonter régulièrement, l'horloge fonctionnant tant que la pile n'est pas épuisée, tantôt on se propose d'obtenir une régularité plus absolue : quoique l'on fasse en effet, dans les horloges, le moteur n'étant pas rigoureusement constant et n'agissant pas toujours de la même manière et au même instant de la marche du pendule, l'isochronisme absolu ne peut exister; les différences de durée d'oscillation sont minimes, mais elles existent et sont appréciables dans le cas des horloges de grande précision comme les horloges astronomiques. On a pensé qu'il était possible de demander à l'électricité de produire cette uniformité absolue d'action, non pas en faisant intervenir directement le courant dont l'effet doit varier avec l'intensité, mais en chargeant le courant de provoquer à un instant de la course du pendule, toujours le même, une action qui fût toujours la même.

C'est ainsi que l'on a établi des horloges dans lesquelles le pendule provoquait, par son mouvement même, le passage, puis la cessations d'un courant qui agissait pour élever d'une hauteur déterminée un petit contrepoids qui retombait toujours de la même quantité et agissait sur une pièce liée au pendule qui recevait ainsi toujours au même instant une impulsion toujours égale à elle-même. Le mouvement du pendule, rendu absolument isochrone, provoquait la marche d'un échappement qui faisait alors mouvoir une série de roues constituant une minuterie ordinaire.

Dans d'autres cas, l'action des poids produisant l'impulsion était remplacée par celle de ressorts qui, à chaque oscillation, bandés de la même quantité, agissaient par leur détente d'une manière toujours identique.

Ces appareils étaient fort compliqués et bien qu'ils aient donné des résultats satisfaisants, ils semblent avoir été abandonnés.

D'autres horloges qui marchent avec une régularité très satisfaisante ont été combinées dans un autre ordre d'idées et présentent une grande simplicité. Elles sont basées en principe sur l'idée suivante : le pendule oscillant et entraînant le mécanisme de l'horloge, ses oscillations diminuent d'amplitude; lorsqu'elles ont été réduites à une valeur déterminée à l'avance, un courant est envoyé dans l'appareil et par l'intermédiaire d'un électro-aimant donne une impulsion au pendule qui reprend sa déviation primitive. On

ne saurait d'ailleurs préciser à l'avance après combien d'oscillations l'effet doit se produire, car la diminution de l'amplitude ne se produit pas toujours également vite; c'est le pendule même qui doit provoquer l'émission du courant au moment où l'amplitude a atteint la valeur minima fixée à l'avance.

635. — Nous indiquerons sommairement le principe de l'horloge construite sur les indications de M. Hipp.

Le pendule porte inférieurement une traverse A (fig. 514) de fer doux perpendiculaire au plan de l'oscillation, et au-dessous une petite languette C mobile autour d'un axe qui la traverse à sa partie supérieure. Au-dessous du pendule, et placé à quelque distance de la verticale du point de suspension, se trouve un électro-aimant (non représenté sur la figure); la traverse de fer doux passe à une très petite distance de ses noyaux : entre les branches de cet électro-aimant et un peu au-dessous de la base supérieure se trouve une

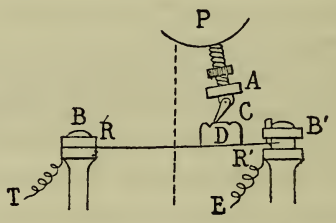


Fig. 514. — Principe de l'horloge de M. Hipp.

lame de ressort RR′ fixée à une extrémité B et qui, lorsqu'elle est abaissée, par l'autre extrémité R′, vient toucher un contact et fermant un circuit, fait passer un courant dans l'électro-aimant; au repos elle vient buter contre une vis de réglage isolée en B′. Sur cette lame, et en dehors de la ligne de symétrie également, se trouve une pièce métallique saillante D présentant deux encoches et que vient frotter la languette mobile à chaque oscillation.

Tant que l'amplitude des oscillations ne sera pas trop diminuée, la languette passe en s'infléchissant sur cette pièce métallique sans s'y arrêter, le ressort situé au-dessous reste au repos, le courant ne s'établit pas. Lorsque les oscillations deviendront plus courtes, il y aura un sens pour lequel le même effet se produira; mais dans le sens contraire, la languette restera dans une encoche quand le pendule sera au bout de sa course, et, au mouvement inverse, cette languette pressée par la tige à laquelle elle est fixée se redressera et appuiera sur la pièce métallique, le ressort fléchira, le courant passera,

l'électro-aimant attirera la traverse de fer doux et une impulsion sera communiquée au pendule, lui faisant reprendre son amplitude primitive. Cette action cesse d'ailleurs aussitôt, parce que, par l'oscillation même, la languette est promptement dégagée et le ressort se relève.

On voit que, par l'emploi de ce système, si les oscillations ne sont pas rigoureusement isochrones, elles restent limitées entre certaines valeurs déterminées à l'avance, de telle sorte que, périodiquement, la marche est régulière.

La transmission du mouvement du pendule à la minuterie ne présente rien de particulier qui doive nous arrêter.

Comme modèle d'horloges dans lesquelles on a recherché plutôt une simplification de fonctionnement qu'une régularisation absolue, nous citerons le principe d'une ingénieuse horloge, sans entrer d'ailleurs dans les détails.

L'appareil est une horloge à ressort fonctionnant comme les pendules d'appartement : elle présente seulement un petit moteur électrique qui est en relation avec le barillet qui contient le ressort. A chaque heure, par suite d'une disposition facile à concevoir, un courant est envoyé dans le moteur qui se met en mouvement et remonte ainsi l'horloge. Mais par le mécanisme même, le mouvement s'arrête quand le barillet a été remonté de la quantité précise qui correspond à son déroulement pendant une heure.

L'appareil fonctionnera ainsi aussi longtemps que la pile ne sera pas usée ; l'horloge marchera plus régulièrement que dans les conditions ordinaires puisque, à chaque heure, le ressort moteur aura repris la même tension, ce qui n'arrive pas dans la marche ordinaire où il y a une grande différence entre la tension initiale et la tension finale du ressort.

636. Méthode générale d'enregistrement des phénomènes mécaniques et physiques. — L'étude des phénomènes de mouvement en physique et en mécanique par la méthode d'enregistrement direct présente des avantages certains que ce n'est pas ici le lieu d'examiner en détail ; bornons-nous à dire qu'elle diminue les erreurs d'une manière générale et que, de plus, elle est presque la seule applicable pour l'observation détaillée de phénomènes d'une très courte durée ou présentant des variations très rapides. On sait que le principe consiste à relier invariablement le corps en mouvement à un style qui trace une trajectoire à la surface d'un corps se déplaçant suivant une loi que l'on connaît ; on n'emploie guère que les surfaces cylindriques. De l'étude de la forme de la courbe tracée

(courbe qui est une trajectoire relative) et de la connaissance de la loi du mouvement de la surface sur laquelle se fait l'enregistrement, on peut déduire la loi du mouvement du style et par suite la loi du mouvement du corps auquel le style est relié. La machine de Morin pour l'étude de la pesanteur est un exemple classique de ce procédé que M. le professeur Marey a si souvent et si ingénieusement appliqué dans un grand nombre de recherches de physiologie animale.

Deux points essentiels sont à étudier dans ce procédé : la loi du mouvement de la surface d'enregistrement et le mode de liaison du corps que l'on étudie au style inscripteur.

Dans un certain nombre de cas, alors que les temps qu'il s'agit d'apprécier ne sont pas très petits, on se borne à donner au cylindre sur lequel se fait l'inscription un mouvement que l'on rend aussi uniforme que possible à l'aide de régulateurs de vitesses (régulateurs à ailettes, régulateurs Foucault, régulateurs Yvon-Villarceau etc.). On peut alors considérer les espaces comptés perpendiculairement aux génératrices comme proportionnels aux temps. Mais cette solution est insuffisante dans le cas où les temps qu'il faut considérer ont de très petites durées; de plus, il est peu aisé d'avoir la vitesse absolue de rotation et par conséquent de pouvoir faire une mesure absolue du temps; il est possible seulement de comparer des durées, d'avoir des valeurs proportionnelles de ces temps.

D'autre part, la liaison matérielle du style et du corps que l'on étudie n'est pas sans présenter des inconvénients; elle entraîne des frottements en divers points, frottements qui, non seulement amènent une discordance entre le mouvement du style et celui du corps, mais qui, de plus, si le corps n'a qu'une faible masse, peuvent réagir sur son mouvement et lui apporter des modifications qui troublent la loi de ce mouvement. Puis les pièces du mécanisme d'inscription, quelque légères qu'elles soient ont une certaine masse qui intervient également pour modifier la nature du mouvement lors de la transmission. Les appareils de transmission à air, tambours pneumatiques de M. Marey, ne sont pas à l'abri de ces reproches qui présentent d'autant plus d'importance que les mouvements à étudier sont plus rapides.

L'électricité a fourni le moyen de parer à ces deux inconvénients et a permis de construire des chronographes à l'aide desquels on peut : étudier avec précision des phénomènes se succédant très rapidement, d'une durée très courte; mesurer cette durée; et, dans un certain nombre de cas, parvenir à la détermination de la loi du mouvement.

Étudions rapidement les dispositions qui sont le plus souvent adoptées d'une manière générale pour la construction des chronographes.

637. Des électro-diapasons. — On sait qu'un diapason que l'on fait vibrer exécute des oscillations qui, à la même température, ont la même durée, durée qui est liée à la hauteur du son rendu par le diapason. Si l'amplitude des oscillations reste invariable, les durées sont rigoureusement égales ; elles présentent une différence si l'amplitude varie, mais cette différence est le plus souvent absolument négligeable si l'amplitude est faible, ce qui est le cas général. On

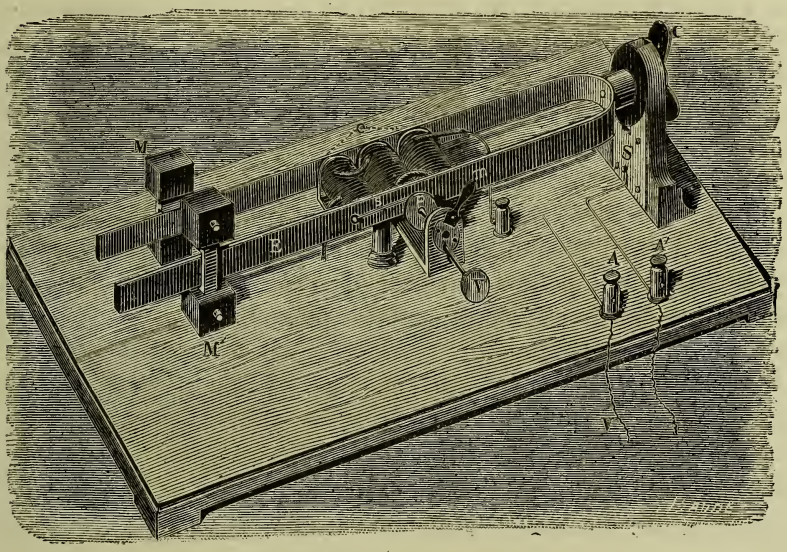


Fig. 515. — Électro-diapason. (*La Lumière électrique.*)

conçoit que l'on puisse utiliser ces vibrations pour mesurer des temps de très courte durée, par suite pour déterminer la loi des mouvements rapides : mais l'application présente des difficultés avec des diapasons ordinaires dont le mouvement vibratoire s'affaiblit rapidement et s'éteint peu de temps après l'instant où il a commencé.

Grâce à l'électricité on peut avoir des diapasons entretenus dont le mouvement se continue invariable aussi longtemps qu'il est nécessaire ; c'est ce que l'on appelle des électro-diapasons. Nous décrirons le modèle qu'a fait construire M. Mercadier en appliquant, en les modifiant avantageusement, une idée qui avait été employée déjà.

Un électro-diapason se compose d'un diapason E (fig. 515) monté

sur un pied pesant S auquel il est solidement fixé; entre ses branches se trouvent des électro-aimants *e* dont les pôles sont respectivement à des distances égales de ces branches. Le fil de l'électro-aimant aboutit d'une part à un pôle d'une pile par la borne A et d'autre part à la monture du diapason; celui-ci porte en un point d'une de ses branches un fil d'acier, d'argent ou mieux de platine dont le bout libre se trouve à une petite distance d'une lame de platine qui est reliée à l'autre fil de la pile. On voit que, au repos, le circuit est ouvert, l'électro-aimant n'agit pas, la pile ne travaille pas; mais, lorsque le diapason vibre, à chaque oscillation le fil de platine touche le contact, le courant s'établit, l'électro-aimant agit; si donc, on a réglé les distances de manière que le contact ait lieu vers la fin de l'oscillation, l'action attractive de l'électro-aimant s'exercera sur chaque branche d'abord pour arrêter le mouvement qui se serait bientôt éteint, puis pour donner une impulsion en sens contraire; l'action est de courte durée parce que, par suite même de ce mouvement de retour, le contact cesse bientôt entre le fil et la lame de platine, le courant cesse de passer, l'électro-aimant redevient inactif. Mais cette impulsion, bien que faible, se reproduisant à chaque oscillation, suffit pour compenser les causes qui produiraient la diminution de l'amplitude, de telle sorte que le mouvement oscillatoire continue indéfiniment.

638. — Quelques détails de construction sont intéressants à signaler, parce qu'ils facilitent l'emploi de ces appareils.

Pour pouvoir régler, dans une certaine mesure l'amplitude des oscillations, il faut pouvoir faire varier la distance de la plaque de platine au fil : à cet effet la plaque est montée à l'extrémité d'une vis qui permet de l'avancer ou de la reculer quelque peu. Cette plaque peut d'ailleurs tourner autour de l'axe de la vis de manière que le fil qui la touche excentriquement puisse être mis en contact pendant la durée de l'expérience avec des points différents de la plaque. La netteté de celle-ci est nécessaire pour assurer le passage du courant et elle peut être altérée à la suite d'un certain nombre d'étincelles.

La durée de l'oscillation varie naturellement avec les dimensions de la lame vibrante, longueur et épaisseur; la largeur (dimension transversale perpendiculaire à celles des vibrations) n'intervient pas, de telle sorte que sans changer le nombre des vibrations par seconde on peut faire varier la masse vibrante, ce qui peut être utile dans quelques circonstances.

Pour pouvoir changer plus ou moins notablement la durée des vibrations, de lourds curseurs métalliques M peuvent être fixés sur

les branches dont ils ralentissent le mouvement; on peut changer lerr position suivant qu'ils ont à produire un effet plus ou moins notable.

Enfin, en général, l'électro-aimant peut glisser parallèlement à l'axe du diapason de manière à occuper diverses positions, ce qui permet de faire varier l'effet qu'il produit.

Les électro-diapasons peuvent être utilisés pour obtenir dix ou quinze vibrations par seconde, ils peuvent être choisis de manière à exécuter deux mille vibrations simples (soit mille périodes ou vibrations doubles.)

Dans le cas d'oscillations relativement lentes on peut arriver à

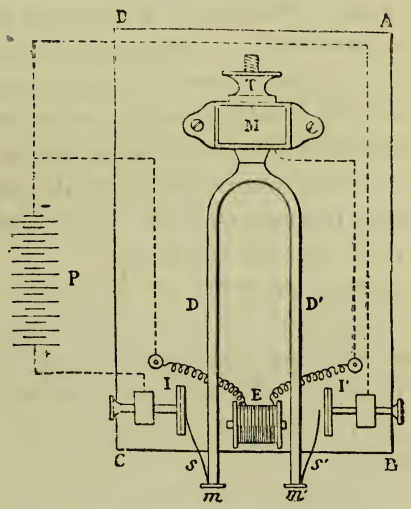


Fig. 516.

obtenir une amplitude presque rigoureusement constante à l'aide de la disposition suivante : les deux branches du diapason portent chacune un fil métallique *s* et *s'*. Le premier *s*, placé en face du disque I fonctionne comme il a été dit plus haut pour fermer le circuit PIsDMEP et entretenir le mouvement. Le fil *s'* est à quelque distance du disque I' qu'il touche seulement lors des grandes oscillations; lorsque cet effet se produit, il s'établit une dérivation par PIsMs'I'ADP et le courant qui traverse l'électro-aimant s'affaiblit ce qui diminue l'impulsion communiquée aux branches. Sitôt que les oscillations ont diminué, cette dérivation est supprimée, et l'électro-aimant produit intégralement son effet.

639. Emplois divers des électro-diapasons. — Disons que l'électro-

diapason peut être utilisé pour produire dans un circuit des interruptions fréquentes et isochrones. A cet effet, le style en platine est monté sur une plaque isolante et se trouve directement réuni par un fil lâche avec la borne où aboutira le fil de la pile : le fonctionnement de cet organe sera donc exactement le même que celui que nous venons d'indiquer. Mais, de plus, il y a sur l'autre branche une plaque isolante portant également un style qui se meut en face d'une lame de platine et un fil lâche aboutissant à une borne; cette borne, d'une part, la vis, d'autre part, servent à relier ces pièces au circuit en expérience, circuit qui comprend naturellement une pile spéciale. A chaque contact du fil de platine et de la plaque, le circuit sera fermé, il sera ouvert à chaque oscillation quand le fil s'écartera de la plaque de platine. Le rapport des durées de la fermeture et de l'ouverture pourra être varié en changeant la position de la plaque.

Une disposition de ce genre peut être employée pour l'étude pratique des piles destinées à la télégraphie, en recherchant quelle est leur durée et comment varie leur marche lorsqu'elles sont soumises à un nombre déterminé et très grand de passages et d'interruptions de courants. Des appareils de ce genre ont pu fonctionner pendant dix-huit mois sans interruption.

Les électro-diapasons peuvent servir à produire des courants interrompus pour l'étude de certaines questions de physiologie; outre qu'ils permettent de préciser le nombre et la durée, le rythme des interruptions, on a une idée précise de la force électro-motrice qui a servi, ce qui n'existe pas lorsque l'on fait usage d'appareils d'induction.

640. – L'électro-diapason peut directement servir à déterminer avec précision la loi d'un mouvement même très rapide et de peu de durée. Voici, par exemple, comment M. le colonel Sebert a étudié la loi du recul d'une pièce à feu.

Pour déterminer la loi du recul, on fixe à la pièce et parallèlement à son axe une lame d'acier flexible qui glisse sur une planchette entre des guides et au-dessous d'un électro-diapason; la lame d'acier a été préalablement enfumée; les vibrations sont perpendiculaires à la longueur de ce ruban. Si l'on déplace le ruban d'acier sans faire vibrer le diapason, un style adapté à l'une des branches de celui-ci décrit une ligne droite, axe de la courbe qui sera tracée ultérieurement; si, le ruban étant immobile, on fait vibrer le diapason, le style trace une petite droite dont la longueur dépend de l'amplitude des vibrations et qui est perpendiculaire à la droite précédente. Si les deux mouvements ont lieu simultanément le style trace

une courbe sinueuse; cette courbe serait une sinusoïde régulière si le mouvement de la lame d'acier était uniforme. En réalité c'est une courbe dont les sinuosités sont inégales, leurs longueurs allant en croissant avec le temps : l'étude de cette courbe permet de tracer la courbe du mouvement. En effet les vibrations étant d'égales durées, les distances qui séparent deux maxima consécutifs correspondent à des temps égaux; d'autre part, cette distance mesure précisément l'espace dont s'est déplacé le ruban d'acier et, par suite, la pièce à laquelle il était invariablement lié.

Il est possible, en employant un ruban d'une certaine largeur, d'enregistrer simultanément d'autres phénomènes: il suffit de placer à côté de l'électro-diapason des appareils enregistreurs dont nous parlerons plus loin.

M. le colonel Sebert employait un électro-diapason modifié par M. Marcel Deprez qui exécutait 1500 vibrations par seconde : il a pu reconnaître des faits intéressants. Sur un canon de 24, par exemple, lançant un projectile de 144 kilogrammes, la vitesse de l'affût est de $3^m,80$ au moment où le projectile quitte la pièce; elle augmente et atteint un maximum de $5^m,20$ alors que le projectile est à 15 mètres de la pièce.

641. Des chronographes. — On ne peut toujours charger l'électro-diapason de tracer presque directement la loi d'un mouvement; mais on a pu en faire la pièce essentielle de presque tous les modèles de chronographes.

Les modèles de chronographes les plus employés sont les chronographes à cylindre. Ils consistent en un cylindre auquel on communique un mouvement de rotation autour de son axe, mouvement aussi régulier que possible sans qu'il soit nécessaire de le rendre absoment uniforme. Un style appuie légèrement sur ce cylindre dont la surface a été enfumée et y trace une courbe continue, mais dont la forme dépend naturellement du mouvement qui a été communiqué au style; le mouvement n'étant pas uniforme, on ne peut mesurer les temps par les espaces comptés perpendiculairement aux génératrices. Pour effectuer cette mesure, on a placé, à côté du style enregistrant le phénomène étudié, un électro-diapason qui décrit une sinusoïde et comme précédemment, on sait que les distances qui séparent deux maxima consécutifs correspondent à des durées absolument égales entre elles et qui sont la durée même d'une vibration. Si donc on a un diapason faisant 1000 vibrations par seconde et si un phénomène intermittent est représenté par deux crochets tracés par le style enregistreur en comptant le nombre des maxima de la

sinusoïde qui séparent ces deux crochets, ce nombre représente en millièmes de seconde le temps qui a séparé les deux effets considérés (en supposant bien entendu que l'on emploie un enregistreur qui n'introduise pas des erreurs dans l'enregistrement). Si même la vitesse du cylindre est un peu grande, on pourra effectuer les mesures en observant les courbes tracées à la loupe ou au microscope; il sera possible d'évaluer, par exemple, la position d'un crochet par rapport au maximum le plus voisin en dixièmes de l'espace qui sépare deux maxima; le temps sera alors déterminé avec une approximation qui atteint 0,0001.

Si le phénomène qu'il s'agit d'enregistrer est d'une courte durée, moindre que celle qui correspond à un tour du cylindre on pourra opérer comme nous venons de le dire; mais en général, il n'en sera pas ainsi et il se présente une difficulté : les courbes correspondant aux divers tours successifs se superposeront et il ne sera pas possible de rien distinguer et de faire une étude du mouvement. Deux moyens sont principalement employés pour parer à cet inconvénient :

1° L'électro-diapason et l'enregistreur ou les enregistreurs sont fixes; mais le cylindre est monté sur un axe qui le dépasse à chaque extrémité d'une longueur un peu supérieure à sa longueur; un de ses prolongements est cylindrique et tourne librement dans un collier où il peut avancer, l'autre est fileté et passe dans un écrou fixe; lors donc que l'on fera tourner le cylindre, il avancera en même temps le long de son axe, c'est-à-dire que, en réalité, il prendra un mouvement héliçoïdal. Pendant ce mouvement si l'électro-diapason et les enregistreurs sont immobiles, leurs styles traceront à la surface enfumée du cylindre des hélices ayant le même pas que la vis de l'axe, hélices qui par développement donneront des droites obliques aux génératrices. Si les enregistreurs et les électro-diapasons sont en mouvement, ils traceront des courbes dont les ordonnées doivent être comptées à partir de ces hélices; ces courbes, suivant ainsi les hélices, ne se superposeront pas si l'on a choisi pour la vis un pas qui ne soit pas trop petit.

2° Le cylindre tourne sans avancer; mais l'électro-diapason et les enregistreurs sont placés sur un chariot mobile; ce chariot est relié à un écrou qui ne peut que tourner sans glisser. Lorsque l'on fera tourner la vis, l'écrou et le chariot se déplaceront parallèlement au cylindre. Si le cylindre tourne en même temps, les styles traceront des hélices ou des courbes qui s'enrouleront en hélice sur le cylindre. Le pas de ces hélices dépendra de la vitesse de déplacement du chariot et par suite de la vitesse de la rotation communiquée à l'axe

moteur. C'est là un avantage, car suivant les phénomènes à étudier on pourra faire varier le pas des hélices, comme d'autre part on fera varier la rotation du cylindre.

642. Des enregistreurs. — Le mode d'enregistrement des phénomènes n'est pas sans présenter des difficultés réelles, comme nous l'avons indiqué; jusqu'à présent on n'a pas appliqué l'électricité à la solution du problème complet qui consiste à faire décrire à un style une trajectoire quelconque suivant une loi donnée, la trajectoire et la loi du mouvement étant liées par une relation déterminée et simple avec celle d'un corps donné; on n'a même pas cherché à réaliser le cas plus simple où la trajectoire étant rectiligne ou circulaire, la transmission de la loi du mouvement était le seul point à considérer. M. Marcel Deprez a indiqué, il est vrai, la possibilité de résoudre le problème mais l'idée ne paraît pas avoir été réalisée.

Par contre, on a appliqué l'électricité à l'enregistrement de phénomènes brusques, presque instantanés, ou encore à l'enregistrement du début et de la fin d'un phénomène : on conçoit aisément, comme nous allons le dire, que l'on puisse arriver à ce résultat, mais il se présente des difficultés sérieuses lorsque l'on désire faire les mesures avec une grande précision.

Imaginons que, comme Wheatstone semble le premier l'avoir réalisé, on place devant un électro-aimant une palette reliée à un style; au repos la palette bute sur un arrêt contre lequel l'appuie un ressort; quand, par l'influence du courant, l'électro-aimant devient actif, la palette est attirée pour revenir à sa position primitive lorsque le courant cesse de passer; disposons l'appareil devant le cylindre d'un appareil enregistreur, d'un chronographe, de manière que le style appuie sur sa surface; il tracera une hélice continue tant que le courant ne passe pas; si le courant est envoyé pendant un temps très court, le style qui se meut avec la palette exécutera une oscillation complète pour revenir à sa position de repos; l'hélice sera interrompue au point correspondant et présentera une dentelure; une seconde dentelure se produira par un second passage du courant et il sera possible d'évaluer le temps qui sépare les deux actions si l'on a inscrit à côté de l'hélice la courbe sinusoïdale produite par un électro-diapason. Il n'est pas difficile d'imaginer des dispositions qui produisent ainsi l'envoi d'un courant dans l'enregistreur au moment où se manifeste une action déterminée; la disposition doit d'ailleurs se modifier suivant l'action produite.

643. — Mais, dans la pratique, cette disposition ne peut être employée que si les signaux à enregistrer ne se succèdent pas trop

rapidement, à moins, comme nous le dirons tout à l'heure, de prendre des dispositions spéciales; outre qu'il faut un certain temps pour que les pièces mobiles se déplacent et reviennent à leur position primitive, temps qui est en rapport avec leur masse et avec la grandeur des forces qui agissent sur elles, il faut un certain temps pour que le fer doux s'aimante et se désaimante. Le style ne se déplaçant que lorsque que l'action du fer doux a atteint une certaine valeur, on conçoit que le signal commencera toujours à se produire un certain temps après que le courant aura commencé, il y aura un retard; mais, dans les mêmes conditions d'expérience et pour un même enregistreur ce retard est toujours le même, il sera donc sans influence si, comme il arrive souvent on évalue le temps qui sépare deux actions caractérisées chacune par un double mouvement du style. Mais ce retard n'est pas sans importance, s'il n'est pas très petit, lorsque l'on compare les tracés fournis par deux enregistreurs différents pour lesquels le retard peut ne pas être le même.

L'erreur n'est pas négligeable pour un enregistreur si l'on veut évaluer le temps compris entre le mouvement qui correspond au commencement du courant et celui qui correspond à la fin, parce que la période de désaimantation n'est pas la même que la période d'aimantation.

D'autre part, s'il s'agit d'enregistrer des phénomènes qui se succèdent rapidement, il faut que le temps qui sépare deux actions consécutives soit plus grand ou au plus égal à la somme des deux périodes d'aimantation et de désaimantation : à cette condition seulement les signaux seront nets.

La difficulté d'obtenir de bons résultats par l'emploi des électro-aimants fit essayer les actions chimiques; mais là se présentent des difficultés d'un autre ordre. Pour produire ces signaux, un style appuie constamment sur un papier préparé qui se déroule régulièrement; lorsque le courant passe il se produit une électrolyse au contact avec le style et, par suite de la nature du papier, une coloration. Mais, pour que l'opération réussisse bien, il faut que le papier présente un certain degré d'humidité et alors, par la dessication, il y aura des variations dans les distances qui existaient entre les signaux, distances qui servent à mesurer les temps. Enfin ajoutons que les traits obtenus ne présentent pas toujours une grande netteté.

644. — Dans le chronographe de M. Schultze le tracé se fait sans mouvement de corps matériel, sans électro-aimant : le cylindre sur lequel se fait l'inscription est argenté et recouvert d'une légère couche de noir de fumée; à une faible distance de sa surface se trouve

un fil de platine placé dans un tube de verre effilé de manière à ne laisser libre que sa section. Ce fil de platine communique avec une bobine d'induction tandis que le cylindre est relié à l'autre borne de la bobine; le phénomène qu'il s'agit d'étudier provoque l'interruption du courant inducteur et par suite la production d'une étincelle entre la pointe et le cylindre. Cette étincelle détermine au point frappé une petite auréole au centre de laquelle apparaît un petit point très brillant.

Cette méthode serait satisfaisante si l'étincelle se produisait toujours sur le point du cylindre dont la distance au fil de platine est la plus petite ; mais il n'en est point ainsi, l'étincelle se produit suivant le chemin qui offre la plus petite résistance à l'électricité et ce chemin ne se confond pas toujours avec le chemin géométriquement le plus court. Il en résulte que la position relative du point brillant et du fil de platine n'est pas toujours la même, et comme les temps sont appréciés par la position du point brillant, il en résulte une indétermination sur l'évaluation des durées, indétermination qui, pour un même écart, dépend nécessairement de la vitesse du cylindre. M. Marcel Deprez, par des expériences directes, a mis en évidence d'une manière certaine les faits que nous signalons.

645. — Se basant sur les considérations que nous venons d'exposer sommairement et qu'il avait étudiées expérimentalement d'une manière très complète, M. Marcel Deprez pensa qu'il convenait de revenir à l'emploi des électro-aimants en modifiant les appareils conformément aux indications théoriques, et il construisit un enregistreur électrique qui paraît convenir dans la plupart des cas : il en existe plusieurs modèles présentant de légères différences, nous en décrirons deux formes.

L'enregistreur ou signal électrique se compose de deux électro-aimants droits E, E (fig. 517) placés parallèlement, mais non sur le prolongement l'une de l'autre : les noyaux sont des lames de fer doux méplates présentant une faible masse et il n'y a qu'un petit nombre de spires, ces deux dispositions tendent à diminuer le retard de l'aimantation et de la désaimantation. Entre les pôles qui sont voisins est placée une lame de fer doux A pouvant tourner autour d'un axe C B situé à égale distance de ces pôles et parallèlement aux lames de fer qui constituent les noyaux, de telle sorte que lorsque le courant passera cette lame sera soumise à l'action d'un couple. Lorsque le courant est interrompu, la lame est écartée légèrement des pôles par l'action d'un ressort droit K fixé à l'axe de

rotation, ressort dont à l'aide d'un levier mobile F G on peut faire varier la tension et la raideur; l'écart est limité d'ailleurs parce que la palette vient buter contre la pointe d'une vis J que l'on peut déplacer à volonté. Enfin l'axe de rotation porte perpendiculairement une petite lame d'acier pointue et recourbée C D qui sert de style inscripteur.

On comprend sans difficulté comment la palette se meut lors du

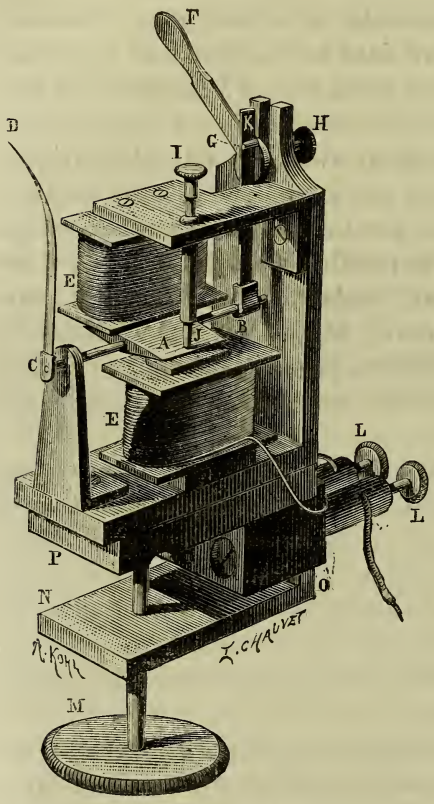


Fig. 517. — Signal électrique de Marcel Deprez. (*La Lumière électrique.*)

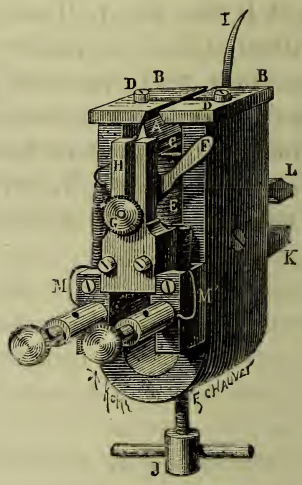


Fig. 518. — Signal électrique Marcel Deprez. (*La Lumière électrique.*)

passage ou lors de l'interruption du courant et comment le mouvement du style en est la conséquence.

Avec cet appareil on peut obtenir nettement 500 signaux par seconde; M. Marcel Deprez a d'ailleurs fait construire d'autres modèles plus petits, mais basés sur le même principe et pouvant inscrire 1600 signaux par seconde.

Dans un autre modèle (fig. 518) il n'y a qu'un électro-aimant

droit E ; l'un des pôles est relié par une charnière à un petit prisme triangulaire de fer doux A qui porte le style I. Le tout est placé à l'intérieur d'un aimant à branches recourbées dont les pôles sont munis de pièces polaires de fer doux B B dont les bords internes sont taillés obliquement de manière à laisser un espace trapézoïdal dans lequel s'insère le prisme mobile dont les dimensions transversales sont un peu moindres. Par l'action d'un léger ressort, on amène ce prisme à occuper une position moyenne à égale distance des pièces polaires. Le passage d'un courant dans l'électro-aimant en polarisant ce prisme le jettera sur l'une de ces pièces dont il s'écartera aussitôt que le courant cessera de passer : le style sera alors déplacé dans un sens, puis dans l'autre.

On peut encore opérer un peu différemment : on laisse le prisme se coller sur une des pièces polaires et on tend le ressort jusqu'à ce qu'un effort très faible soit suffisant pour produire la séparation ; si l'on vient alors à faire passer dans l'électro-aimant un courant qui ait pour effet de donner au prisme la même aimantation que celle de la pièce sur laquelle il s'appuie, il en résultera une répulsion, le prisme sera projeté sur l'autre pièce polaire, il reviendra à sa position primitive lorsque le courant cessera.

L'avantage de ces deux dispositions, c'est qu'une aimantation très faible suffit pour provoquer les mouvements que, par suite, il suffira d'un courant de très courte durée. Par des expériences de mesure directe, M. Marcel Deprez a reconnu qu'il suffit de fermer le courant pendant $\frac{1}{40000}$ de seconde et que l'effet se produit avec un retard de $\frac{1}{1000}$ de seconde.

645. Indicateur des niveaux d'eau. — L'électricité permet d'obtenir l'enregistrement à distance de phénomènes déterminés à l'aide d'appareils spécialement construits dans ce but : c'est ainsi que l'on peut avoir des indicateurs de pression, de niveau, de température, etc. Dans un certain nombre de cas, le problème est simplifié et il suffit de signaler le moment où une valeur déterminée d'avance est atteinte, en général, la valeur la plus forte ou la plus faible : nous donnerons quelques exemples d'appareils de l'un et l'autre genres.

Les indicateurs de niveau d'eau sont très nombreux ; ils font connaître à distance les variations de niveau d'un liquide dans un réservoir, soit par le mouvement d'une aiguille sur un cadran, soit par le tracé d'une courbe sur un cylindre enregistreur.

En général on ne cherche pas à obtenir une courbe continue

fournissant à chaque instant le niveau; ce résultat ne serait pas impossible à atteindre, mais il exigerait que la pile fonctionnât d'une manière également continue, ce qui est évidemment une mauvaise condition : on se borne à enregistrer des indications discontinues; tantôt ces indications sont prises périodiquement après un temps déterminé d'avance; dans d'autres cas, l'enregistrement se produit lorsque la variation de la quantité que l'on étudie a atteint une valeur déterminée à l'avance.

Cette dernière condition se trouve dans l'indicateur de niveau d'eau de M. Parenthou, dont nous allons indiquer le principe.

Comme dans presque tous les indicateurs de niveau, l'appareil qui sert de transmetteur est mis en mouvement par un flotteur porté par une chaîne qui passe sur une roue; dans le système Parenthou, la chaîne a une disposition particulière destinée à maintenir constante la force motrice qui varie ordinairement par le fait que, à chaque mouvement, une partie de la chaîne passe d'un côté à l'autre de la poulie. Ici la chaîne est composée de cylindres reliés par des chaînettes et espacés d'une distance égale à leur longueur. La partie qui ne porte pas le flotteur s'engage dans un tube fermé où repose son extrémité libre : quand la chaîne descend de ce côté, les cylindres reposent successivement les uns sur les autres cessant ainsi d'agir sur la roue motrice ; on reconnaît aisément que la longueur active, différence entre les longueurs des deux brins suspendus, est constante.

La poulie R (fig. 519) sur laquelle passe la chaîne et qui tourne proportionnellement aux déplacements du niveau de l'eau est munie de dents et engrène avec un pignon P dont le mouvement produit les émissions de courant qui mettront le récepteur en action. Deux conditions essentielles doivent présider à cette transmission : 1° il faut que le récepteur subisse des actions inverses suivant que le niveau montera ou qu'il descendra ; 2° on ne cherche pas à enregistrer toutes les variations de niveau, mais seulement celles qui dépassent une valeur fixée à l'avance, 5 centimètres par exemple.

Pour satisfaire à la première condition, en employant un seul fil de ligne, l'appareil est disposé, ainsi que nous l'indiquerons, de manière à ce que le courant émis soit direct ou inverse suivant le sens de la rotation du pignon, par suite suivant le sens du déplacement du niveau. Le récepteur sera en relation avec un relais polarisé qui, suivant le sens du courant, fera agir deux pièces distinctes signalant l'une l'élévation du niveau, l'autre son abaissement.

Pour satisfaire à la deuxième condition il faut que la liaison entre

le pignon moteur et l'organe qui provoque l'émission des courants ne soit pas invariable, que le pignon puisse se déplacer entre certaines limites sans émettre de courant, mais que l'émission se produise dès que ces limites sont atteintes.

Voici l'indication générale des dispositions prises.

Le pignon P présente une rainure AB représentant un arc de cercle de 90° dans laquelle pénètre l'extrémité C d'une cheville CC′ (fig. 519 et 520) fixée à une pièce qui peut tourner autour de l'axe OO′ qui coïncide en direction avec l'axe du pignon mais qui en est indépendant. Au repos cette pièce FH est verticale et la cheville C est sur la verticale du centre O, au-dessus ou au-dessous.

Lorsque le pignon se déplace d'une petite quantité dans un sens ou dans l'autre, son mouvement ne se communique pas à la che-

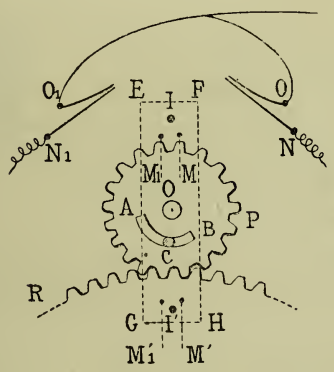


Fig. 519.

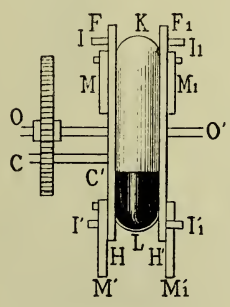


Fig. 520.

ville, le basculeur FH reste par suite immobile. Celui-ci ne commence à se mettre en mouvement que lorsque la cheville est rencontrée par les extrémités de la rainure ; à partir de cet instant, si le pignon continue à tourner dans le même sens, la cheville et le basculeur FH se meuvent ensemble, jusqu'à l'instant où la cheville a dépassé légèrement l'horizontale du centre. A ce moment la pièce FH continue seule son mouvement, indépendant du pignon ; elle porte en effet un récipient en verre contenant du mercure qui passe brusquement d'une extrémité à l'autre dès que l'axe de l'appareil a dépassé l'horizontale, faisant ainsi basculer la pièce FH, qui est ramenée à la verticale.

On voit donc que tant que le déplacement du pignon n'a pas atteint un arc de 180° le basculeur FH ne se déplace pas ou ne s'in-

cline que peu, mais qu'il exécute une demi-révolution complète dès que le pignon a tourné de plus de 180°. Si donc le développement du pignon correspond aux limites de variation de niveau qu'il faut indiquer et si chaque mouvement de bascule provoque une émission de courant, il est aisé de voir qu'on aura satisfait à la deuxième condition.

Pour pouvoir distinguer s'il s'agit d'une élévation de niveau ou d'un abaissement en employant un seul fil de ligne, la ligne se divise en deux conducteurs qui aboutissent à deux contacts O et O_1 (fig. 519); le premier est parallèle à un ressort N qui aboutit au pôle + d'une pile dont le pôle — est à la terre, le deuxième O_1 est parallèle à un ressort N_1 qui est relié au pôle — d'une autre pile dont le pôle + est à la terre ; lorsque l'un de ces ressorts sera appuyé sur le contact correspondant, il s'établira donc un courant dans

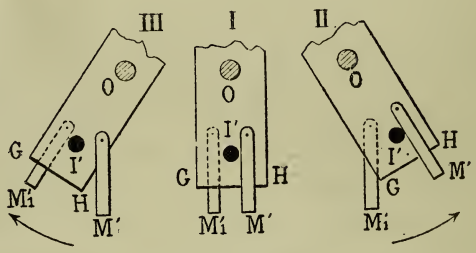


Fig. 521.

la ligne, courant direct si le contact a lieu entre O et N, courant inverse si le contact a lieu en O_1 et N_1.

Mais ces deux contacts ne sont pas dans un même plan, la pièce N par exemple est en avant, au niveau de la face antérieure du basculeur FH_1 ; le ressort N_1 est en arrière, au niveau de la face postérieure de cette pièce mobile ; de telle sorte que le courant direct s'établira lorsqu'un doigt porté sur la face antérieure, exécutant avec la basculeur une demi-révolution, viendra rencontrer le ressort N, tandis que le courant inverse s'établira lorsqu'un doigt porté sur la face postérieure du basculeur rencontrera le ressort N_1.

Pour que ces émissions de courants aient lieu convenablement, il faut que le contact provoqué par le doigt antérieur ait lieu seulement lorsque la rotation a lieu dans un sens déterminé et que le contact provoqué par le doigt postérieur se produise seulement quand la rotation a lieu en sens contraire.

Ces doigts sont mobiles autour de leur sommet; pour une extrémité du basculeur, l'un est en avant, l'autre est en arrière ; de plus, ils ne sont pas en face l'un de l'autre l'un, M′ (fig, 521) par exemple est à droite de l'axe, l'autre M'_1 est à gauche. Sur l'axe du basculeur se trouvent deux chevilles l'une en avant I′, l'autre en arrière, I'_1 (la même disposition se retrouve à l'autre extrémité). Quand le basculeur est vertical, il en est de même des doigts; mais lors que le basculeur s'inclinera, l'un des doigts seulement restera vertical, l'autre s'appuyant sur la cheville correspondante restera parallèle à l'axe du basculeur ; ce sera M′ (II) ou M'_1 (III) suivant que la rotation du basculeur s'effecctuera dans un sens ou dans l'autre, suivant par conséquent que le niveau montera ou descendra; c'est

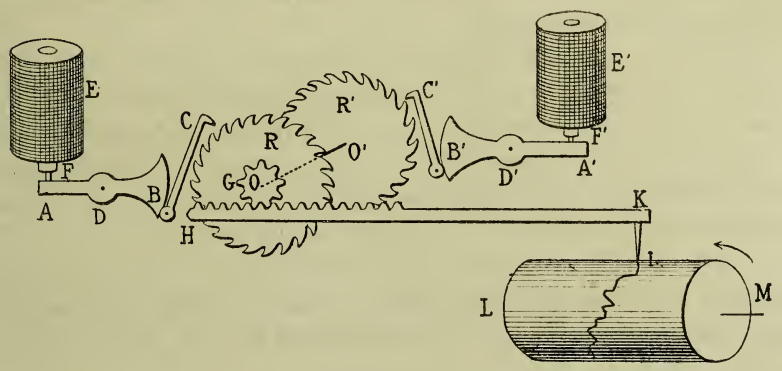


Fig. 522.

ce doigt ainsi maintenu qui établira le contact assurant le passage d'un courant.

On voit donc que chaque demi-révolution du basculeur provoquera une émission de courant et une seule, et que le courant qui s'établira sera direct ou inverse, suivant que la rotation aura lieu dans un sens ou dans l'autre, c'est-à-dire suivant que le niveau se sera abaissé ou élevé.

Le récepteur comprend un axe OO′ (fig. 522) sur lequel sont montées deux roues à rochet R et R′, solidaires mais dont les dents sont taillées en sens contraire. Dans le plan de chaque roue se trouve un levier AB,A′B′ mobile autour du centre D et D′. L'extrémité B, qui est pesante, porte une tige articulée à son extrémité inférieure et qui, supérieurement, se termine par un doigt pénétrant dans les dents de la roue correspondante. Lorsque le levier tourne sous l'influence

du poids B, le doigt pénètre dans les dents et entraîne la roue; lorsque, au contraire, le levier est mû en sens contraire, le doigt glisse sur les dents sans entraîner la roue. Le contact cesse d'ailleurs quand le levier est ramené à sa position de repos, de telle sorte que le mouvement provoqué par un doigt n'est pas gêné par l'autre doigt.

Au-dessus de l'extrémité A du levier, se trouve une bobine creuse dans laquelle pénètre un cylindre de fer doux d'un poids assez considérable pour maintenir le levier horizontal malgré le poids de l'extrémité B; mais quand le fil de la bobine est traversé par un courant, le fer doux est attiré, soulevé, il cesse d'agir sur le levier qui s'incline sous l'influence du contrepoids B et fait tourner la roue : les déplacements du levier sont limités par des vis de butée de manière à ce que chacun de ses mouvements fasse mouvoir la roue d'une dent seulement.

On voit que l'action de l'électro-aimant n'est pas directe; ce n'est pas elle qui provoque le mouvement, elle consiste seulement à supprimer l'obstacle qui empêchait le levier d'obéir au poids B; cette disposition est ingénieuse, elle assure la régularité de l'effet produit qui, dû toujours à la même cause, est indépendant de l'énergie plus ou moins vive, plus ou moins brusque même de l'électro-aimant. Si l'on avait disposé le levier de manière à être mû par l'aimant, comme il arrive dans beaucoup d'appareils, on aurait risqué que dans les mouvements brusques, le crochet ne sautât deux ou plusieurs dents au lieu d'une.

La ligne, comme nous l'avons indiqué déjà, aboutit à un relais polarisé qui, suivant que le courant reçu est direct ou inverse, envoie le courant d'une pile locale soit dans l'électro-aimant E, soit dans l'électro-aimant E′; suivant que le courant passe d'un côté ou de l'antre, c'est un levier ou l'autre qui agit, les roues et l'axe tournent donc dans un sens ou dans l'autre.

Si donc l'émission d'un courant direct qui correspond par exemple à l'élévation du niveau fait tourner l'axe dans un certain sens, l'établissement d'un courant inverse qui correspond à l'abaissement du niveau fait tourner l'axe en sens contraire. De plus chaque émission correspondant à une variation de niveau produit un déplacement correspondant à une dent. Si donc on place une aiguille sur l'axe OO′, ses déplacements sur un cadran feront nécessairement connaître les variations du niveau.

Cet appareil peut aisément être transformé en instrument enregistreur : pour cela on installe sur l'axe OO′ un pignon G qui

engrène avec une crémaillère horizontale HK terminée par un crayon KI dont la pointe se déplace parallèlement aux génératrices d'un cylindre enregistreur LM qui tourne d'un mouvement uniforme. Les déplacements de la crémaillère et de I sont proportionnels aux déplacements angulaires de l'axe OO′ et par suite aux variations du niveau de l'eau; la courbe tracée renseigne donc d'une manière continue sur celles-ci.

L'appareil est en fonctions dans des réservoirs d'eau de la ville de Paris : il donne de bons résultats.

En changeant les dimensions de la roue et du pignon moteur, il serait facile d'enregistrer des variations de niveau moindre que celle de 5 centimètres qui a été adoptée dans ce modèle : on pourrait, paraît-il, aller jusqu'à enregistrer les variations par millimètres.

647. — Sans vouloir entrer dans le détail des appareils, nous dirons que certains inventeurs ont adopté une autre disposition générale : à des intervalles de temps déterminés à l'avance on produit un signal, variant suivant les appareils, et qui fait connaître, non les variations de niveau, mais la position du niveau actuel par rapport à un plan de comparaison invariable. Cette disposition présente l'avantage de rendre les observations indépendantes, de telle sorte que si l'une des indications a été faussée par une cause quelconque, l'erreur ne se reporte pas sur toutes les indications ultérieures, comme il arrive nécessairement lorsque l'on enregistre seulement les variations de niveau.

Signalons encore les indicateurs de MM. Siemens et Halke : le flotteur, par l'intermédiaire d'une chaîne et d'une poulie, agit sur un ressort contenu dans un barillet de manière à le bander; mais suivant le sens du mouvement la poulie fait tourner soit l'axe, soit la boîte du barillet. Lorsque la tension a atteint une certaine valeur qui est en rapport avec l'étendue des variations que l'on veut signaler, il y a échappement et le ressort tourne rapidement entraînant la bobine d'une machine magnéto-électrique qui envoie un courant dans la ligne; suivant que la poulie a tourné dans un sens ou dans l'autre entraînant un contact, ce courant est envoyé dans l'un des deux fils qui constituent la ligne. Au récepteur le courant est envoyé dans l'un ou l'autre des deux électro-aimants qui s'y trouvent et qui, par suite de l'action d'un moteur à roue satellite, fait tourner l'aiguille dans un sens ou dans l'autre; cette aiguille se déplace ainsi d'une même quantité chaque fois que le niveau varie d'une quantité fixée à l'avance.

On remarquera que cet appareil n'exige pas l'emploi de piles, le courant étant produit par la machine d'induction.

Signalons encore un autre appareil des mêmes savants qui présente la particularité de ne pas fournir d'indication d'une manière constante, mais seulement lorsque l'observateur vient à presser sur un bouton. Après chaque observation, l'aiguille est ramenée au zéro, ce qui évite que les erreurs ne s'ajoutent.

648. — Dans un assez grand nombre de cas, il n'est pas nécessaire de connaître absolument le niveau d'un liquide dans un réservoir déterminé, et il peut suffire d'être averti lorsque ce niveau dépasse certaine limite soit lorsqu'il s'élève, soit lorsqu'il s'abaisse en dehors des plans fixés à l'avance. Les appareils de ce genre sont simples : un flotteur A (fig. 523) porte une tige BC guidée dans

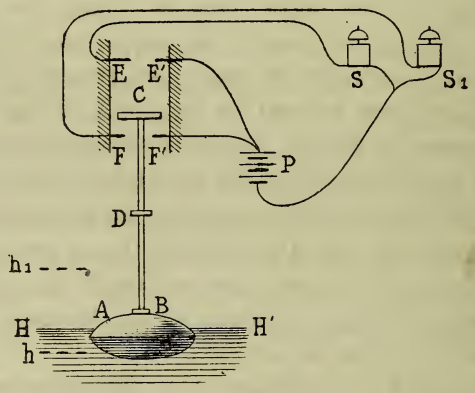


Fig. 523. — Indicateur de niveau d'eau.

son mouvement vertical en D et dont l'extrémité supérieure vient fermer un circuit lorsqu'elle arrive à une hauteur déterminée; une sonnerie placée dans ce circuit entre alors en action. On conçoit que la disposition puisse être telle que la fermeture se produira dans des circuits différents suivant que le niveau parvient à sa limite inférieure F F' ou à sa limite supérieure E E' : des sonneries S, S_1 n'ayant pas le même caractère seront intercalées dans ces circuits de telle sorte que, d'après le son produit, on sera renseigné sur la circonstance qui se manifeste.

On a proposé d'utiliser les courants produits dans ces circuits, non seulement pour provoquer des sonneries annonçant le manque où l'excès d'eau dans une chaudière à vapeur; mais encore pour assurer l'alimentation régulière automatique. M. Achard, notam-

ment, a imaginé une disposition particulière; l'alimentation se fait d'une manière continue, mais le passage d'un courant a pour effet de provoquer l'ouverture plus large d'un robinet; celui d'un autre courant, d'en provoquer la fermeture. Les courants produits par la fermeture en E ou en F pourraient être ainsi utilisés; mais nous doutons que les résultats puissent dans la pratique, remplacer une surveillance attentive.

649. Indicateurs de température. — L'emploi des courants électriques permet d'être renseigné à distance sur la température d'un point déterminé; on peut, par exemple, enregistrer d'une manière continue ou périodique, les indications d'un galvanomètre relié à une pile thermo-électrique. Dans un grand nombre de circonstances dans l'industrie, il est seulement nécessaire d'être informé lorsque la température s'abaisse au-dessous ou s'élève au-dessus de valeurs déterminées d'avance et qui correspondent aux limites entre lesquelles l'opération se produit dans les conditions convenables; on peut demander d'être averti seulement que ces limites sont atteintes et peuvent être dépassées, afin de prendre les mesures qui ramènent la température entre ces limites; on peut demander que le réglage se fasse automatiquement. Au point de vue de l'action de l'électricité, il n'y a pas de différences entre ces deux conditions : s'il s'agit d'un avertisseur simple, il faut que, lorsque la température aura atteint une des limites imposées, un courant prenne naissance dans un circuit et fasse marcher une sonnerie et que, lorsque l'autre limite sera atteinte à son tour, un courant prenne naissance dans un autre circuit et fasse fonctionner une autre sonnerie. Ces deux circuits fonctionnant séparément dans les circonstances opposées peuvent être reliés à des appareils autres que des sonneries; les courants qui les traversent animant des électro-aimants peuvent, par exemple, ouvrir une bouche de chaleur ou la fermer, ouvrir une prise d'air froid ou la fermer; s'il s'agit d'une étuve ou d'un appareil chauffé au gaz, ils peuvent ouvrir ou fermer le robinet d'arrivée de manière à augmenter ou à diminuer le débit du gaz. Il y a là des dispositions mécaniques qui varient suivant les circonstances et sur lesquelles nous n'aurons pas à nous arrêter longuement; il suffit de montrer comment les limites extrêmes donnent naissance à des courants différents, capables de produire des actions distinctes.

Nous ajouterons que, comme dans un grand nombre d'autres cas, il est bon, au moins pour les appareils industriels et toutes réserves faites pour les instruments de laboratoire, il est bon de ne pas

demander aux courants l'énergie nécessaire à la mise en train des appareils de réglage, mais qu'il faut avoir un moteur distinct, poids ou ressort, et ne demander à l'électricité que le mouvement d'enclenchement ou de déclenchement qui permet ou arrête l'action du moteur.

Les avertisseurs d'incendie rentrent dans la catégorie des appareils dont nous parlons avec cette simplification qu'ils ne doivent fournir d'indication que lorsque la température aura atteint une limite supérieure ; dans quelques cas, on leur a demandé d'agir automatiquement et d'assurer l'arrivée et la projection de l'eau destinée à éteindre le feu. Nous reviendrons plus loin sur l'inutilité à notre avis de cette dernière disposition.

On désigne quelquefois à tort, croyons-nous, sous le même nom

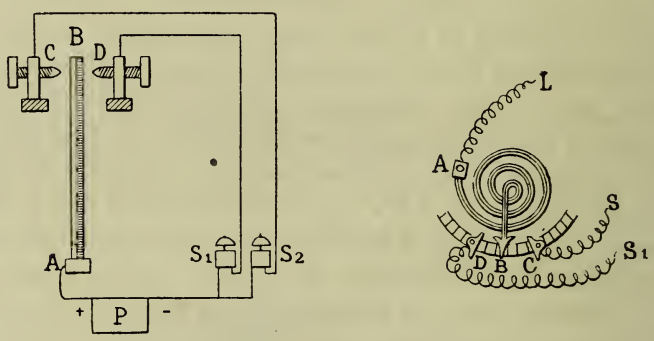


Fig. 524 et 525. — Indicateurs de température.

d'*avertisseurs d'incendie*, des appareils télégraphiques spéciaux qui sont utilisés pour prévenir les pompiers et les autorités d'un commencement d'incendie ; mais ils n'ont rien de spécial pour le feu et pourraient tout aussi bien servir à la transmission d'autres indications convenues d'avance (593).

650. — Les indicateurs et régulateurs de température sont presque tous basés sur la dilatation des corps sous l'influence de la chaleur, dilatation des solides, des liquides ou des gaz.

Les solides paraissent donner des appareils pratiques ; voici une disposition qui est simple et rustique.

Une lame bimétallique A B (fig. 524), formée de deux métaux inégalement dilatables et soudés dans la longueur est fixée par une extrémité sur une lame isolante A et communique avec un des pôles d'une pile P ; l'autre extrémité B, libre, est placée entre deux ta-

quets C, D également isolés et communiquant chacun avec une sonnerie S_1, S_2. A une température moyenne déterminée par construction cette extrémité sera également éloignée des deux taquets ; sous l'influence d'une élévation ou d'un abaissement de température elle se courbera dans un sens ou dans l'autre et viendra toucher l'un ou l'autre taquet, mettant en action par ce contact la sonnerie correspondante.

La limite de variation de la température dépend de la distance des taquets; si donc ces taquets sont montés sur des vis, il sera possible de faire varier à volonté les températures pour lesquelles les sonneries fonctionnent. Une disposition commode consiste à placer chaque taquet à l'extrémité d'une aiguille montée à frottement dur sur un axe isolant commun; l'autre extrémité se meut sur un cadran dont les divisions correspondent aux divers degrés de température, de telle sorte qu'il suffit de placer cette extrémité sur

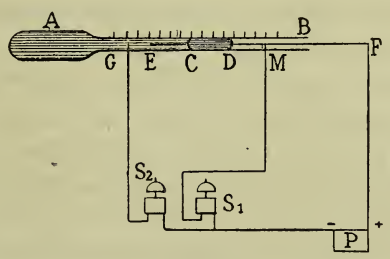


Fig. 526.

une division pour que la sonnerie correspondante fonctionne lorsque cette température sera atteinte.

Une disposition différente de forme, mais identique en principe, consiste à donner à la lame bimétallique une disposition en spirale, cette courbe s'ouvre plus ou moins suivant la variation de la température (fig. 525).

La dilatation des liquides a été utilisée également : on peut concevoir par exemple un thermomètre à alcool AB (fig. 526) dont la colonne liquide est surmontée par un assez long index de mercure CD qui par l'intermédiaire d'un fil de platine EF est en relation avec un pôle d'une pile P. Deux autres fils de platine G,M soudés dans le verre de part et d'autre de l'index de mercure sont reliés chacun avec une sonnerie S_1, S_2; lorsque la température s'élève, l'index s'avance, finit par rencontrer le fil de platine M et la sonnerie S_1 entre en action; si la température s'abaisse, l'index se

ment en sens contraire, vient rencontrer l'autre fil de platine G et l'autre sonnerie S_2 fonctionne.

Cette disposition présente l'inconvénient de ne pouvoir faire varier les limites de température; on y obvie en employant des tiges pénétrant dans le tube et que l'on peut fixer à diverses hauteurs; il va sans dire que le fil qui correspond à la limite inférieure est alors recouvert d'une couche isolante sur la partie qui traverse le mercure et que sa pointe seule est libre.

L'emploi du mercure ne paraît d'ailleurs pas très satisfaisant; outre qu'il exige l'emploi de vases de verre, susceptibles de se briser assez facilement, sa surface se recouvre rapidement d'une couche d'impuretés, couche mauvaise conductrice qui gêne et retarde le passage du courant.

Les contacts solides sont également susceptibles de se recouvrir de substances étrangères, mais il est facile de les maintenir nets et on peut s'astreindre à ce soin pour un appareil dont le fonctionnement est constamment utile et qui fait partie de l'outillage industriel.

651. Avertisseurs d'incendie. — Ainsi que nous l'avons dit, les avertisseurs d'incendie proprement dits ne sont rien autre chose que des indicateurs de température destinés seulement à avertir lorsque la température a atteint une valeur supérieure que l'on admet ne pouvoir se produire, sauf des cas exceptionnels, que lorsqu'un incendie a commencé.

D'une manière générale, ces appareils ne semblent pas appelés à rendre de très grands services; on ne peut placer qu'un nombre restreint de ces appareils et il est possible que le feu commence en un point assez éloigné de chacun d'eux pour que leur fonctionnement ne se manifeste que lorsque le danger sera devenu réel; nous signalerons, il est vrai, une disposition qui a pour but de parer à cet inconvénient; ajoutons que dans nombre de cas, dans certaines industries par exemple, c'est en des points déterminés que le feu a seulement des chances de se propager et que c'est en ces points seulement que l'avertisseur est utile et que son utilité peut être alors d'autant plus réelle qu'il sera possible de réunir en ces points un nombre suffisant d'appareils pour être assuré que l'un, au moins, fonctionnera à la moindre alarme.

Un autre inconvénient consiste en ce que ces appareils n'étant pas destinés à fonctionner d'une manière courante, les surfaces par lesquelles doit s'établir le contact métallique se ternissent à la longue et deviennent incapables de laisser passer l'électricité au moment où elles sont rapprochées l'une de l'autre.

L'entretien de la propreté de ces surfaces est un embarras, d'autant que, en général, ces avertisseurs sont placés à la partie supérieure des pièces où va s'accumuler naturellement l'air chaud et sont, en outre, peu accessibles. Pour parer à cet inconvénient très réel, on a imaginé diverses dispositions telles que l'appareil avertisseur est utilisé à un autre emploi, par exemple à servir comme sonnerie électrique, de manière que, par l'usage constant, les contacts sont toujours entretenus en état de propreté.

Enfin une autre difficulté provient du choix de la température considérée comme dangereuse, celle pour laquelle l'avertissement doit être donné. Si on la prend trop élevée, le danger peut être devenu réel avant que le signal soit donné ; si on ne la prend pas assez élevée, il peut arriver que, soit par les chaleurs de l'été, soit par l'accumulation d'air chaud à la suite d'un chauffage prolongé, la température limite soit atteinte sans que, en réalité, il y ait danger, incendie. On a également obvié à cet inconvénient en disposant des appareils qui ne fonctionnent que si l'élévation de température est brusque, mais non si elle se produit lentement.

D'autres raisons encore, indépendantes des appareils, sont invoquées contre l'emploi des avertisseurs d'incendie et expliquent au moins dans une certaine mesure que leur emploi ait été très restreint jusqu'à présent : c'est, d'une part, le fait que des incendies couvent et se propagent longtemps sans élévation de température apparente pour éclater brusquement et d'une manière grave, comme il arrive par exemple lorsque les poutres de plancher ou de cloisons viennent à se consumer lentement, ou à l'abri du contact de l'air, au moins à peu près : les flammes apparaissent alors inopinément sur plusieurs points lorsque, par une circonstance quelconque, l'air a accès à ces pièces qui jusque-là se consumaient lentement.

Il faut joindre encore à ces objections, l'opinion que les avertisseurs d'incendie en général sont dangereux en ce que, donnant une sécurité qui quelquefois n'est pas réelle, ils font négliger les précautions les plus simples et deviennent par là-même un péril. Mais, outre qu'on ne peut les considérer que comme un moyen d'avertissement qui ne doit pas faire négliger les autres, nous croyons qu'ils peuvent être réellement efficaces à la condition de s'assurer fréquemment qu'ils fonctionnent d'une manière régulière.

Aussi, nous le répétons, sauf dans quelques usines, les avertisseurs d'incendie sont peu utilisés jusqu'à présent. Nous ne signalerons donc que quelques modèles considérés comme types, ou présentant des dispositions spéciales et intéressantes.

652. — Les appareils dont nous avons indiqué les principes comme indicateurs de température peuvent évidemment servir d'avertisseurs d'incendie : il suffit de ne conserver que la partie du mécanisme qui correspond à la limite supérieure et à fixer celle-ci à 40° en général, quelquefois même à 35°; ces températures, la dernière surtout, nous paraissent un peu basses et peuvent être atteintes sans qu'il y ait incendie.

Parmi les modèles employés, nous signalerons celui de MM. Gaulne et Mildé qui assure le bon fonctionnement des contacts en faisant servir l'appareil comme sonnerie.

L'appareil (fig. 527) est constitué par deux lames thermométriques formées de zinc-cuivre-acier et placées presque parallèlement dans le voisinage l'une de l'autre de manière que le métal le plus dilatable, le zinc, soit placé en dehors; ces lames sont fixées à leur partie inférieure sur un support isolant et sont reliées par des fils métalliques l'une à la pile et l'autre à la sonnerie; à leurs parties supérieures elles sont terminées par des ressorts munis de contacts qui, lorsqu'ils viendront à se toucher, fermeront le circuit et mettront la sonnerie en action. Par l'action de la chaleur, la dilatation courbera les lames l'une vers l'autre et le contact arrivera à se produire ; si la distance des ressorts a été primitivement réglée, ce contact se produira précisément à la température regardée comme dangereuse pour laquelle par conséquent la sonnerie se fera entendre.

D'autre part, derrière les lames thermométriques se trouve une pièce cylindrique isolante qu'un ressort tend à soulever mais qui peut descendre d'une petite quantité lorsqu'on l'attire par sa partie inférieure; ce cylindre porte à sa partie supérieure une cheville métallique et sa course est limitée par un arrêt placé de telle sorte que, lorsque le cylindre est abaissé, la cheville se trouve précisément entre les deux contacts et ferme ainsi le circuit. On place l'avertisseur à la partie supérieure de la pièce et on y adapte un cordon de tirage; la netteté des contacts sera entretenue par le frottement de la cheville chaque fois que l'on agira sur le cordon pour se servir de la sonnerie.

Dans cet appareil et dans d'autres modèles construits sur des principes analogues, l'appareil fonctionne dès que la température limite est atteinte sans qu'aucune distinction soit établie entre les cas où cette température est atteinte lentement ou brusquement; ce qui peut correspondre à des circonstances très différentes.

Il n'en est pas de même de l'avertisseur de M. Brasseur qui, bien

que basé sur le principe de la dilatation des solides répond ingénieusement à la nécessité d'établir une distinction entre l'échauffement *lent* qui se produit normalement en été ou par l'action de l'appareil de chauffage et l'échauffement *brusque* qui résulte d'un commencement d'incendie. Cet avertisseur se compose de deux

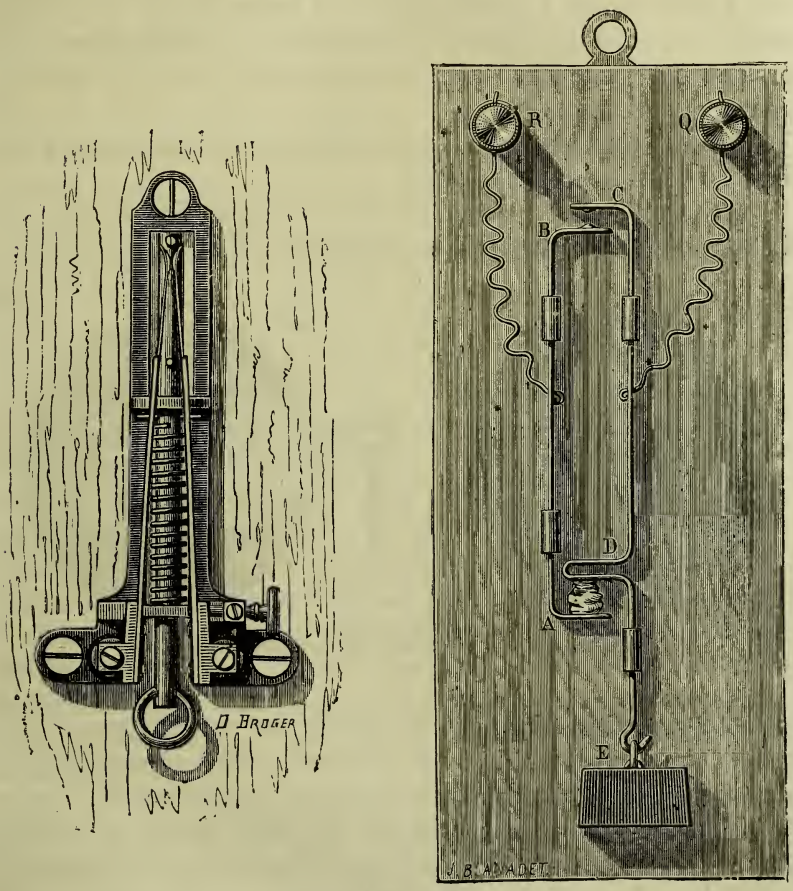


Fig. 527 et 528. — Avertisseurs d'incendie. (*La Lumière électrique.*)

cylindres creux en zinc dont la surface extérieure est noircie pour augmenter le pouvoir absorbant; les cylindres sont fixés inférieurement sur une base fixe ; l'un de ces cylindres est vide, l'autre est rempli de suif. A la partie supérieure, ils supportent une traverse de cuivre qui est en communication avec la pile et au-dessus de laquelle est une vis en relation avec la sonnerie. Lorsque survient

une élévation brusque de température; les deux cylindres se dilatent l'un et l'autre, la traverse de cuivre est soulevée et vient toucher la vis, ce qui ferme le circuit et met la sonnerie en action; la position de la vis est fixée d'après la température choisie comme limite. S'il se produit au contraire une élévation lente, le suif entre en fusion à partir de 33° et, de ce moment le cylindre vide se dilate seul, l'autre restant à la température de fusion du suif; la traverse de cuivre au lieu de s'élever horizontalement, s'incline donc et dès lors ne vient pas toucher la vis, le circuit reste ouvert, la sonnerie n'entre pas en action.

653. — Il existe des avertisseurs basés sur le changement d'état des corps, fusion ou vaporisation.

Nous signalerons comme premier exemple l'avertisseur de M. Dupré dans lequel deux pièces métalliques AB,CD (fig. 528) dont le

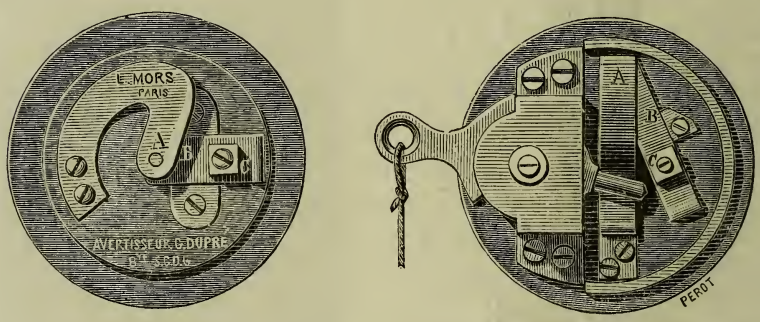


Fig. 529 et 530. — Avertisseurs d'incendie Dupré. (*Mors*)

contact fermerait le circuit sont séparées par une boulette ou une pastille d'une substance isolante facilement fusible; lorsque la température atteint le point de fusion de cette substance (suif, cire ou stéarine) elle passe à l'état liquide, les deux pièces métalliques arrivent au contact par l'action d'un poids E ou d'un ressort et le circuit étant fermé la sonnerie fonctionne.

Pour éviter l'inconvénient qui peut résulter de ce que les pièces métalliques se recouvrent d'une couche isolante par l'action du temps, M. Dupré a disposé son avertisseur de manière à servir en même temps de bouton d'appel pour une sonnerie. A cet effet, le bouton comprend comme d'ordinaire deux lames A et B (fig. 529) dont l'une est en communication avec la pile et l'autre avec la sonnerie; la pièce A forme ressort et est naturellement écartée de B qu'elle vient toucher lorsque on appuie sur le bouton qui presse sur elle.

Mais, de plus, la pièce B est une lame élastique pliée en forme d'U, qui par une branche viendrait toucher A, si elle n'était maintenue écartée par l'action d'une pastille fusible C enfilée sur une vis qui traverse la pièce B; quand la température atteint le point de fusion de cette pastille, température qui est ordinairement de 40°, la branche antérieure de la pièce B est rendue libre et venant toucher A ferme le circuit ce qui met la sonnerie en action. Il est évident que les contacts sont entretenus en bon état par l'usage continuel que l'on en fait et, en tout cas, s'ils cessent d'être conducteurs, on en est averti lorsque l'on veut faire un appel.

La figure 530 représente la même disposition appliquée à un bouton d'appel à tirage dont le fonctionnement se comprend aisément.

La vaporisation a été également utilisée; dans une des dispositions qui ont été proposées, l'appareil consiste en un tube en verre courbé en U et fermé à une extrémité; ce tube contient du mercure, mais du côté fermé on a introduit une certaine quantité d'un liquide volatil, un carbure d'hydrogène; ce tube est placé au-dessus d'une petite cuvette à parois isolantes dans laquelle pénètrent les extrémités de deux fils de platine communiquant l'un avec la pile et l'autre avec la sonnerie; ces deux fils étant ainsi isolés, le circuit reste ouvert. Mais lorsque par suite de l'action de la chaleur la température atteint le point d'ébullition du liquide, celui-ci se réduit en vapeurs, augmente de volume, chasse une partie du mercure; ce liquide tombe dans la cuvette et réunit métalliquement les deux fils de platine ce qui ferme le circuit. Comme le mercure agit dans ce cas par sa continuité et non pas d'abord par sa surface, les souillures qui peuvent s'être produites dans le tube par l'action du temps sont sans inconvénient.

654. — Enfin, et sans que nous voulions dire que ce soient là les seuls principes susceptibles d'être appliqués, nous indiquerons encore deux systèmes dans lesquels l'action électrique résulte de la combustion de pièces spéciales.

L'avertisseur de M. Charpentier comprend deux pièces métalliques A et B montées sur une base isolante et communiquant l'une à la pile, l'autre à la sonnerie; elles sont séparées à la partie supérieure de telle sorte que le circuit est normalement ouvert. Entre ces deux pièces se trouve un cylindre isolant portant une bague métallique D; ce cylindre qu'un ressort à boudin tend à soulever est relié à une tige qui supporte un poids qui force la tige à rester abaissée; dans cette position, la bague métallique ne touche pas les ressorts A et B tandis

que, au contraire, elle arrive à leur hauteur et ferme par conséquent le circuit lorsque le cylindre est libre d'obéir à l'action du ressort.

Le poids qui maintient le cylindre ainsi abaissé est relié à la tige par un cordon très combustible; en cas d'incendie, le cordon brûle, le poids tombe, le cylindre remonte, le contact s'établit, la sonnerie fonctionne.

L'appareil est disposé de manière à pouvoir servir de bouton d'appel, afin d'assurer la netteté des contacts; il suffit de le relier à un cordon de tirage qui par l'intermédiaire d'un levier soulève le poids lorsque l'on veut faire agir la sonnerie.

La disposition de MM. Joly et Barbier présente l'avantage qu'il ne s'agit plus d'un petit nombre d'appareils placés en quelques points, mais d'un réseau aussi étendu que l'on veut et qui peut régner en tous les points qui semblent dangereux. L'avertisseur consiste en un câble composé de deux fils isolés communiquant l'un à la pile, l'autre à la sonnerie et n'ayant aucun contact; ils sont recouverts par de la gutta-percha, corps facilement fusible, combustible même, et fortement serrés l'un contre l'autre; lorsque, en un point quelconque, ils sont soumis à l'action d'une flamme ou seulement même d'une température élevée, la gutta-percha fond ou brûle et, disparaissant, laisse à nu les fils qui se trouvent mis en contact; ce qui ferme le circuit et met la sonnerie en action.

On peut évidemment sans difficulté et sans grande dépense établir comme nous l'avons dit un réseau de câble assez étendu pour que l'on puisse être assuré qu'il sera certainement atteint si l'incendie commence, et c'est là un avantage très réel. Malheureusement, il nous semble à craindre que la surface des fils ne se recouvre à la longue d'une couche d'oxyde ou de sulfure, couche isolante qui s'opposera au passage du courant lorsque les fils seront mis à nu et qui rendra par conséquent l'appareil inactif.

655. — Lorsqu'il s'agit d'une installation assez étendue, il ne suffit pas seulement d'être averti du début de l'incendie, il est au moins utile de savoir où porter les secours. Une première disposition est fréquemment employée, elle consiste à avoir un tableau avertisseur analogue à celui qui sert pour les sonneries, de telle sorte que l'on voit immédiatement où est l'appareil qui est entré en action.

Une autre disposition ingénieuse, imaginée par MM. Gérard et Germot, dispense de l'emploi de ce tableau; au point où se produit l'annonce, les fils des divers circuits 1, 2, 3, 4... arrivent à un commutateur à cadran A B, (fig. 531) chaque circuit communiquant à une case ; de plus tous ces circuits se réunissent pour aboutir à la case

où se place la manette au repos. Dans cette situation, aussitôt qu'un appareil fonctionnera, en un point quelconque, la sonnerie S entrera en action. Pour déterminer quel est l'appareil qui agit, on tournera la manette; aussitôt qu'elle aura quitté la position de repos, la sonnerie s'arrêtera et reprendra seulement lorsqu'elle sera placée sur la case qui correspond au circuit sur le parcours duquel a lieu l'incendie, puisque c'est le seul qui soit parcouru par un courant.

656. Régulateurs automatiques de température. — On peut utiliser les courants électriques pour maintenir une température constante dans une enceinte, dans un réservoir; des dispositions très variées ont été proposées, nous en signalerons quelques-unes seulement.

L'organe régulateur proprement dit consiste presque toujours en un réservoir à air ou à liquide placé dans l'enceinte ou le réservoir et communiquant avec un tube en U placé en dehors et contenant

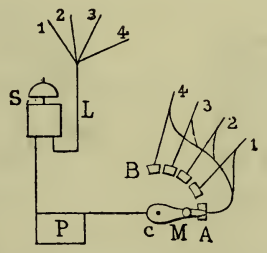


Fig. 531.

une certaine quantité de mercure dans lequel aboutit un fil de platine qui est relié à l'un des pôles d'une pile. Dans la branche ouverte est un fil métallique que l'on peut enfoncer plus ou moins, à volonté, d'après la température qu'il s'agit d'obtenir; ce fil est relié d'autre part à la pile. Lorsque la température dépasse la valeur prévue, le mercure touche le fil et le courant s'établit, il cesse dès que la température est tombée au-dessous de cette valeur.

Sur le trajet du fil se trouve l'appareil qui est chargé de produire les variations de température et qui diffère suivant les systèmes adoptés.

M. d'Arsonval a disposé un régulateur à gaz de la façon suivante : AB (fig. 532) est le tube d'arrivée du gaz, il passe au centre d'une bobine dont il constitue le noyau et qui est intercalée sur le trajet du courant. La bobine est placée dans une boîte cylindrique présentant en C l'orifice de sortie du gaz qui se rend aux brûleurs qui

produisent le chauffage de l'enceinte. Le fond supérieur D est élastique et présente au centre une plaque de fer doux qui lorsqu'elle est abaissée obture plus ou moins l'orifice B d'arrivée du gaz. Tant que la température n'a pas atteint la limité fixée, le courant ne passe pas, le gaz s'écoule librement, la température s'élève peu à peu; quand la limite est atteinte le mercure touche le fil G, le courant passe, la plaque D est attirée, le courant de gaz est sinon arrêté complètement, du moins ralenti, la quantité de chaleur fournie diminue. Si par suite de cette action la température s'abaisse, toute action du régulateur cesse, le gaz passe de nouveau, la quantité de chaleur produite augmente, ce qui élève la température, et ainsi de suite.

657. — On peut obtenir un résultat analogue par l'emploi de lampes, comme des lampes à essence. Voici la disposition adoptée par M. d'Arsonval : il y a comme précédemment le thermomètre à

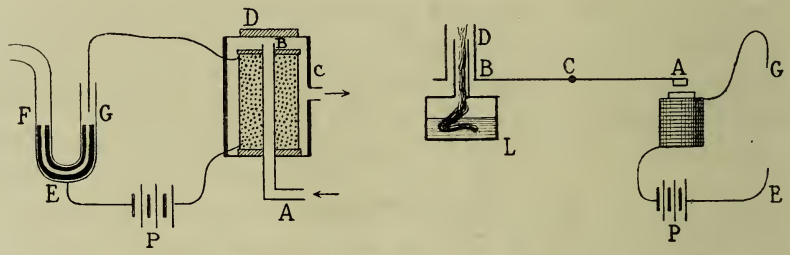


Fig. 532 et 533. — Régulateurs de température.

air régulateur qui, de la même façon, envoie un courant dans la bobine ou l'interrompt. Au-dessus de cette bobine on trouve un levier AB (fig. 533) mobile autour du point C; à l'extrémité B, ce levier supporte un tube D qui entoure le porte-mèche de la lampe L placée au-dessous du réservoir ou du vase dont on veut régler la température. Lorsque le courant ne passe pas, le tube D est abaissé, la mèche est à découvert, la flamme est au maximum; quand la température est trop élevée, le tube D s'élève, recouvre la flamme en partie, diminue la combustion et par suite la quantité de chaleur fournie. Le réglage se fait donc comme dans le cas précédent.

M. Ranque utilise dans le même but sa lampe à extinction et allumage. Le tube à siphon MN (fig. 534) qui est en communication avec le régulateur porte deux fils placés de part et d'autre de la colonne mercurielle dont l'un H est au niveau du mercure et dont l'autre J est un peu au-dessus. La lampe étant allumée, la tempéra-

ture s'élève; le contact s'établit en J par suite de l'élévation de la colonne mercurielle, le courant passe, la lampe s'éteint, la température s'abaisse alors progressivement.

Le courant à d'ailleurs cessé, car le mercure est descendu au-dessous de H; mais par suite du refroidissement, il se rétablit pour cesser aussitôt en J; par son action la lampe se rallume, et ainsi de suite.

Lorsque l'on ne tient pas à avoir un réglage très parfait, on peut prendre comme régulateur un thermomètre à mercure au lieu d'un thermomètre à air.

658. — Les dispositions que nous venons indiquer sont surtout convenables pour des appareils de laboratoire; mais, dans l'indus-

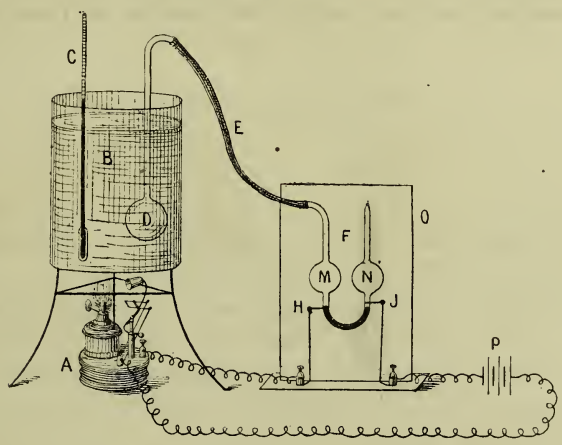


Fig. 534. — Régulateur de température.

trie, elles ne sauraient convenir pour maintenir une température sensiblement constante dans de grandes pièces, dans des ateliers. Dans ce cas, on n'agit pas directement sur la source de chaleur, mais plutôt sur les orifices d'admission de l'air chaud qui est envoyé par le calorifère; le principe général est analogue, le courant passe quand la température s'élève trop, et le passage du courant fait fermer complètement ou non l'orifice d'arrivée de l'air chaud. Quand la température s'abaisse, le courant cesse de passer et l'orifice d'arrivée s'ouvre.

Il peut se présenter des circonstances diverses qui sont exigées par les conditions de l'industrie et auxquelles il est possible de satisfaire par des dispositions variées.

Voici, par exemple, la disposition que M. Du Moncel avait adoptée pour obtenir l'auto-régulation de la température d'une salle où se trouvaient une bouche d'air chaud et une bouche d'air froid et dans laquelle on cherchait seulement à éviter une trop grande élévation de température ; deux fils isolés DE, GH (fig. 535) étaient placés dans le tube d'un thermomètre à mercure AB et leurs pointes nues étaient très voisines l'une de l'autre. Ordinairement la bouche de chaleur était ouverte et la bouche d'air froid était fermée : lorsque la température s'élevait, le mercure montait et à un certain niveau rencontrait le premier fil, un courant s'établissait alors et permettait le mouvement de pièces qui produisait la fermeture de la bouche de chaleur I ; si la cessation de l'arrivée de l'air chaud suffisait, la température s'abaissait, le courant cessait de passer et la bouche de chaleur s'ouvrait ; mais si, malgré la cessation de l'arrivée de l'air

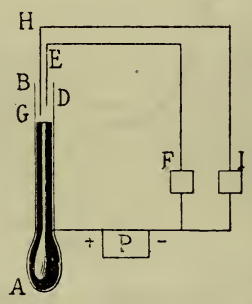


Fig. 535.

chaud la température continuait à monter, le mercure rencontrait le second fil en D et le courant s'établissant dans le second circuit, la bouche d'air froid F s'ouvrait.

On conçoit, sans qu'il soit nécessaire d'insister, que l'on peut utiliser des dispositions tout analogues dans lesquelles on emploierait la dilatation de l'air, ce gaz étant renfermé dans une enveloppe à laquelle est adaptée un tube cylindrique où se meut un index de mercure. A cause de la grande dilatabilité des gaz ce dispositif est trop sensible en général pour les applications industrielles.

659. Indicateur de pressions. — Pour les pressions, comme pour les niveaux, les températures, les indications peuvent être obtenues d'une manière continue ou, seulement, on peut produire des signaux lorsque ces pressions dépassent certaines limites fixées d'avance. La question peut-être résolue d'ailleurs par des procédés

tout analogues : la pression est mesurée par un manomètre à mercure et les variations du niveau de la colonne liquide peuvent être évaluées ainsi que nous l'avons dit précédemment ; on peut aussi, comme précédemment, indiquer par l'action de sonneries que la surface de la colonne mercurielle a dépassé certains niveaux fixés à l'avance et qui correspondent aux limites entre lesquelles la pression doit rester maintenue.

Nous indiquerons plus loin une méthode qui a été appliquée à l'enregistrement de la pression barométrique, mais qui pourrait servir également à l'enregistrement des pressions quelconques.

Lorsqu'il s'agit d'indiquer seulement que les pressions limites sont atteintes, on peut employer une disposition tout analogue à l'une de celles que nous avons décrites pour les températures. On fait usage d'un manomètre métallique, système Bourdon ; l'aiguille reliée à une pile se déplace entre deux taquets métalliques montés sur des supports isolants et reliés à la pile par deux circuits comprenant chacune une sonnerie. Le courant passera dès qu'une pression limite sera atteinte et la sonnerie correspondante entrera en action.

660. Compteur de tours ; loch électrique. — L'électricité se prête fort aisément à enregistrer à distance le nombre des tours d'un arbre, soit à l'aide du déplacement d'une aiguille sur un cadran, soit à l'aide d'une inscription graphique : il suffit évidemment d'avoir sur l'arbre une partie constituée par une matière isolante présentant seulement une languette métallique et sur laquelle pressent deux frotteurs reliés à un circuit comprenant une pile et un récepteur. A chaque tour, lorsque les deux frotteurs appuieront simultanément sur la languette le circuit sera fermé et un courant s'établira.

Le récepteur pourra être constitué sur le principe du télégraphe à cadran et être disposé de sorte que l'aiguille avance d'un cran à chaque émission de courant : il faudra d'ailleurs que l'axe de l'aiguille mette en mouvement des aiguilles mobiles sur d'autres cadrans et enregistrant les unités supérieures, mille, dizaines de mille, etc., comme il arrive dans tous les appareils qui doivent servir à enregistrer de grands nombres.

Le récepteur pourra être analogue à un récepteur Morse et donner un point ou un trait sur un papier se déroulant d'une manière continue, de telle sorte que le nombre des traits indiquera le nombre des tours.

Il va sans dire que si la vitesse était très grande et qu'il ne fût pas

nécessaire d'enregistrer le nombre des tours à une unité près, on pourrait utiliser le mouvement d'un arbre relié à l'arbre moteur par des engrenages, et tournant, par exemple, dix fois ou cent fois moins rapidement.

Des dispositions de ce genre ont été adoptées par M. Le Goarant de Tromelin et par M. Fleuriais pour enregistrer électriquement sur un cadran les indications d'un loch. Ce loch est constitué par une hélice dans l'appareil de M. Le Goarant de Tromelin (fig. 539) et par un moulinet dans celui de M. Fleuriais : on avait déterminé au préalable par des expériences directes les relations qui existaient entre les nombres de tours de l'arbre de rotation et la vitesse du navire.

Il n'est pas nécessaire de disposer l'interrupteur dans une partie étanche comme on l'avait cherché tout d'abord, et on peut laisser

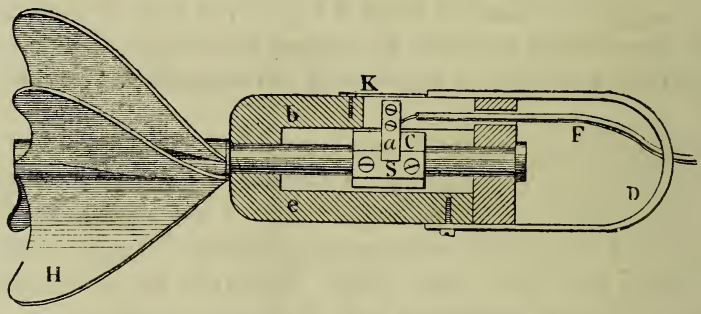


Fig. 536. — Loch électrique. (*La Lumière électrique.*)

cette pièce en contact avec l'eau sans inconvénient; certainement alors, en réalité, le circuit est toujours fermé, mais il existe une différence d'intensité très notable suivant que le courant passe par les pièces métalliques ou que le circuit se complète par le liquide ambiant; cette différence est suffisante pour permettre le fonctionnement du récepteur après qu'il a été convenablement réglé.

661. — Compteur totalisateur de M. Dumoulin-Froment. — Il peut arriver que l'on veuille enregistrer sur un même compteur les nombres de tours *totalisés* exécutés par divers arbres, comme il est arrivé à l'usine à gaz de la Villette où il s'agissait de tenir compte des tours de dix compteurs distincts.

Les mouvements des arbres étant complètement indépendants, on ne pouvait essayer d'opérer simultanément avec les divers appareils, car s'il s'était produit des coïncidences entre les émissions de cou-

rants dues à deux, trois arbres, le compteur n'eût enregistré qu'un tour au lieu de deux ou trois qu'il eut dû marquer. M. Dumoulin-Froment parvint à lever la difficulté en utilisant l'existence du magnétisme rémanent dans les noyaux des électro-aimants.

L'appareil comprend autant d'électro-aimants qu'il y a d'arbres et chaque électro-aimant EE′ (fig. 537) est relié par deux fils au commutateur de l'un des arbres. Devant chacun d'eux est une lame de fer doux BC qu'un faible ressort F écarte du noyau et appuie contre des vis de butée : cette lame fait partie d'un circuit local qui contient un compteur dont l'aiguille avance d'une unité à chaque émission de courant ; le circuit ne peut être fermé qu'au moment où cette lame s'écarte de l'électro-aimant : il faut pour éviter toute erreur s'arranger pour que les diverses lames de fer doux ne puissent quitter les électro-aimants correspondants que *successivement*. A cet effet,

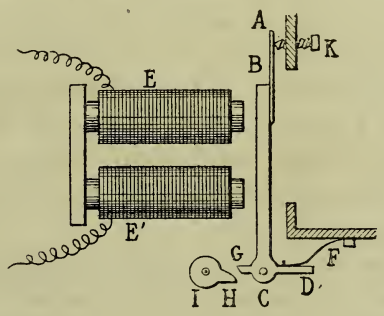


Fig. 537. — Principe du compteur totalisateur.

lorsque l'un des arbres a exécuté un tour complet et a envoyé un courant dans l'électro-aimant, celui-ci a attiré la lame de fer doux et, à cause du magnétisme rémanent et par suite de la faiblesse du ressort antagoniste, celle-ci reste maintenue contre le noyau malgré que le courant ait cessé. Elle ne quittera cette position que sous l'influence d'une action extérieure : celle-ci provient de la rencontre d'une came H montée sur un arbre horizontal I et d'une pièce G liée à la lame de fer doux ; l'arbre tourne régulièrement sous l'influence d'un poids moteur et d'un pendule conique ; à chaque tour, la came que nous considérons passe devant la pièce G, mais elle ne la touche que lorsque la lame de fer doux est appliquée contre l'électro-aimant. Si nous ajoutons que les diverses cames (qui sont en nombre égal à celui des électro-aimants) sont placées dans des plans diamétraux qui sont angulairement équidistants et que,

d'autre part, l'arbre des cames tourne notablement plus vite que les arbres des compteurs, on pourra se rendre compte aisément du fonctionnement de l'appareil.

On voit en effet que quel que soit l'instant où les compteurs auront effectué chacun un tour complet et auront mis en action les électro-aimants correspondants, l'enregistrement ne pourra se faire que successivement pour chacun d'eux au moment où la came correspondante arrivera au contact de la pièce G; il y aura donc pour un tour autant d'unités notées au compteur qu'il y aura eu d'électro-aimants actifs et cela quand même tous ces électro-aimants auraient fonctionné simultanément. Comme d'autre part, les compteurs tournent moins vite que l'arbre des cames, un électro-aimant ne peut recevoir deux courants successifs sans que, dans l'intervalle, la lame de fer doux n'ait été ramenée à la position du repos et n'ait produit, par suite, l'enregistrement d'une unité au compteur.

Nous passons sur quelques détails qui n'ajouteraient rien d'important à l'explication du principe de cet ingénieux appareil.

662. Anémométrographes. — Les anémométrographes sont des appareils destinés à enregistrer la vitesse et la direction du vent : en réalité ils sont presque absolument toujours formés de deux appareils réunis : un enregistreur de la vitesse du vent et un enregistreur de la direction du vent.

Les enregistreurs de la vitesse sont presque exclusivement des compteurs de tours : le récepteur est un moulinet à hélice ou mieux un moulinet à ailettes hémisphériques de Robinson que l'on place au sommet d'un mât; le nombre des tours de l'arbre est enregistré mécaniquement sur un compteur à cadran : un commutateur est disposé sur l'un des axes de manière à fermer un circuit après cent tours par exemple. Le courant ainsi établi traverse le récepteur et fait avancer une aiguille sur un cadran, ou fait inscrire une marque sur un papier qui se déroule, absolument comme nous l'avons dit pour les compteurs de tours en général. Si le papier porte des divisions qui indiquent le temps et si le moulinet a été étalonné au préalable, le nombre des marques recueillies permettra de conclure aisément la vitesse moyenne des vents pendant le temps considéré.

Les enregistreurs de la direction du vent présentent en général une assez grande analogie : ils consistent en une girouette dont la forme est quelconque d'ailleurs et qui s'oriente sous l'action du vent : elle entraîne dans son mouvement une tige métallique qui est reliée à une pile et qui portée par un pied isolant, présente à la

partie inférieure un commutateur. Dans l'anémométrographe de M. Hervé Mangon, ce commutateur (fig. 538) est constitué par un frotteur métallique BA qui tourne sur un plan isolant dans lequel sont enchâssés quatre arcs métalliques N, E, S, W séparés par un faible intervalle et communiquant chacun par un fil avec un électro-aimant du récepteur. Ces arcs métalliques sont orientés de telle sorte que le frotteur se trouve au milieu de chacun d'eux quand la girouette est dirigée vers l'un des points cardinaux exactement; il restera donc sur le même arc tant que la direction du vent ne sera pas écartée de plus de 45° du point cardinal correspondant. Au-dessus de chaque électro-aimant du récepteur se trouve un levier porteur d'un style qui peut s'appuyer sur une bande de papier qui se déroule uniformément : les fils des électro-

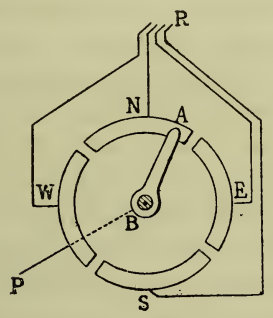


Fig. 538.

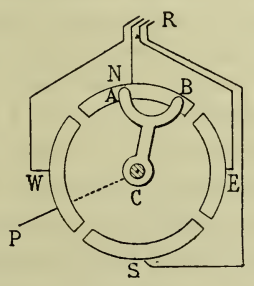


Fig. 539.

aimants sont mis à la terre simultanément à des intervalles de temps déterminés, toutes les dix minutes par exemple. Le courant s'établit dans celui des électro-aimants qui correspond à l'arc métallique sur lequel s'appuie le frotteur du commutateur; le style correspondant tracera donc un trait; après dix minutes, ce sera le même style qui fonctionnera si le vent n'a pas changé de direction, ou du moins s'il n'est pas sorti du rumb où il se trouvait; si la direction a varié, le frotteur s'appuie sur un autre arc, un autre électro-aimant entre en action et un autre style marque un trait; le changement de direction est facile à apprécier, parce que les quatre styles décriraient quatre droites parallèles à la direction du mouvement de papier et que la position des traits successifs montre immédiatement quels sont les styles qui ont fonctionné.

Si la girouette se trouvait exactement à 45° de l'un des points cardinaux, le frotteur dirigé vers une ligne de séparation des arcs

métalliques appuierait à la fois sur les extrémités des deux arcs et les deux styles correspondants entreraient en action; deux traits seraient donc tracés simultanément sur le papier.

Dans l'appareil de M. Mangon, les styles sont constitués par des crayons; pour qu'ils laissent une trace bien marquée, on leur adapte une disposition identique à celle des marteaux des sonneries, de telle sorte qu'ils exécutent des vibrations qui assurent la production du signal.

Un mouvement d'horlogerie est employé à faire dérouler uniformément la bande de papier sur laquelle s'inscrivent en même temps les indications relatives à la vitesse du vent et qui sont transmises par un cinquième électro-aimant; ce mouvement d'horlogerie détermine également la fermeture des circuits d'une manière régulière et périodique.

663. — M. du Moncel a fait construire un appareil analogue, seulement les indications étaient continues ce qui exige un travail de la pile sans interruption, condition qui n'est pas satisfaisante; il serait possible d'avoir des indications très fréquentes au lieu de ne les recueillir que toutes les dix minutes, sans pour cela les avoir continuement. Le commutateur comprenait huit arcs métalliques pour permettre d'obtenir une plus grande précision dans l'indication du vent, ce qui exigeait huit fils conducteurs et huit électro-aimants. Enfin l'enregistrement se faisait sur un cylindre.

Dans un anémométrographe de M. Salleron, on retrouve l'enregistrement périodique, mais sur un cylindre et non sur une bande de papier : en outre, point intéressant, c'est que, à l'aide de 4 fils et de 4 électro-aimants, on enregistre 8 directions distinctes pour le vent.

A cet effet le commutateur (fig. 539) est formé de 4 arcs de cercle comme celui de M. Mangon; mais le frotteur A B C qui reçoit le courant par le centre est bifurqué en fourche dont les pointes sont à 45° l'une de l'autre. La direction de la manette passe par le milieu de l'arc lorsque la girouette est sur le point cardinal correspondant; les deux pointes touchent alors le même arc et ne mettent en action qu'un seul électro-aimant. Il en sera de même tant que la manette et, par suite, la girouette auront tourné d'un angle moindre que 22°30′; mais si la rotation a dépassé cette valeur, les pointes se trouveront sur deux arcs voisins et deux traits apparaîtront, apprenant ainsi que le vent a une direction intermédiaire à celle des points cardinaux.

Lorsque le récepteur n'est pas éloigné de la girouette la multi-

plicité des fils a peu d'inconvénients; il n'en est pas de même lorsque la distance est grande, aussi a-t-on cherché à construire des appareils dont la transmission se fasse par un fil unique. M. Hardy a donné une solution du problème dont nous allons exposer le principe. La girouette et le commutateur (fig. 540) sont disposés comme dans l'appareil de M. Mangon, le récepteur également, mais la communication entre les deux appareils n'est pas directe, mais a lieu par l'intermédiaire d'un transmetteur relié au commutateur par 4 fils et au récepteur par un fil unique LL'. Les 4 arcs métalliques du commutateur communiquent à 4 frottoirs F, G, H, K fixes devant lesquels toutes les 10 minutes passe un butoir OM mû par une horloge et relié au fil de ligne; un courant s'établit dans la ligne quand ce butoir touche le frotteur correspondant au vent qui souffle. Le récepteur présente une distribution analogue : un butoir O'M' relié au fil de ligne se meut devant 4 frotteurs correspondant aux 4 électro-aimants; les mouvements des deux butoirs sont absolument synchrones de telle sorte qu'ils passent au même instant devant

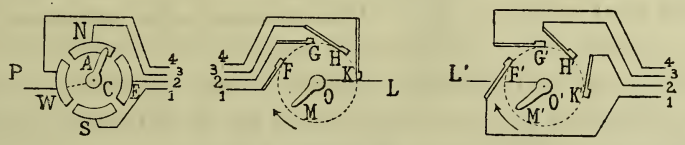


Fig. 540.

les pièces qui se correspondent. A chaque tour du butoir de départ, il y a donc un courant qui est émis au moment du contact avec l'un des frotteurs et, à l'arrivée, le butoir envoie le courant dans l'électro-aimant dont il rencontre le frotteur, électro-aimant qui dès lors fonctionne seul.

Il va sans dire que les indications ne sont bonnes que si le synchronisme existe entre les mouvements des butoirs; on ne peut compter sur les mécanismes d'horlogerie pour produire et maintenir cette identité de mouvement. C'est l'électricité qui, par une disposition analogue à celle de la remise à l'heure (633), ramène les deux butoirs dans la même position à chaque période de 10 minutes avant que le contact avec les frotteurs ne commence à s'établir, corrigeant ainsi les petites différences qui auraient pu prendre naissance entre la marche des deux horloges pendant cette période.

Nous signalerons plus loin (667) une autre solution du même problème.

664. Météorographe universel de MM. Van Rysselberghe et Schubart. — Cet appareil a été imaginé pour produire à distance l'enregistrement graphique des diverses données météorologiques, la méthode et la disposition générale adoptées pour cet usage particulier peuvent d'ailleurs être utilisées dans un assez grand nombre de cas différents.

Le météorographe universel a figuré à l'Exposition d'électricité de 1881 et a été remarqué ; il a été installé également entre Ostende et Bruxelles ; il est complexe dans son ensemble parce qu'il représente la superposition d'instruments divers, chacun de ceux-ci étant simple en réalité. Indiquons d'abord le principe tel qu'il est appliqué au baromètre, par exemple.

Le baromètre dont on fait usage est un baromètre à siphon à branches de même diamètre, de telle sorte qu'il suffit d'enregistrer les variations de niveau de la branche ouverte pour avoir, en les doublant, les variations de la pression barométrique. Une tige d'acier, une *sonde* S mobile verticalement est placée au-dessus de cette branche, elle est reliée mécaniquement à un appareil moteur, comme nous allons le dire ; électriquement elle communique au pôle + d'une pile N tandis que le mercure du baromètre est relié au pôle — par un circuit qui comprend divers appareils ; ce circuit reste ouvert tant que la sonde ne touche pas le mercure, il est fermé et le courant s'établit quand le contact a lieu.

Une horloge, à des instants déterminés, communique un mouvement uniforme à un cylindre enregistreur C sur l'axe duquel sont montées deux demi-roues dentées B_1 B_2 qui engrènent successivement avec une roue conique D à laquelle est relié un pignon qui fait mouvoir une crémaillère E qui porte la sonde S. Au repos, la sonde est en haut de sa course ; lorsque le cylindre commence à se mouvoir elle descend, rencontre le mercure à une certaine hauteur, ce qui établit un courant, et continue sa descente ; mais au bout d'une demi-révolution le sens de la rotation de la roue D change et la crémaillère remonte entraînant la sonde. Le temps qui s'écoule entre l'instant où la sonde commence à descendre et celui où le courant s'établit dépend de la position du niveau du mercure et par conséquent de la valeur de la pression atmosphérique.

Parallèlement à l'axe du cylindre enregistreur est une vis le long de laquelle se meut un écrou qui ne peut tourner et qui porte un électro-aimant M qui fait partie du circuit ; la palette de l'électro-aimant mobile autour d'un axe porte une pointe P placée près du cylindre et qui s'appuie contre sa surface lorsque le courant

passe; lorsqu'il cesse, un ressort l'en éloigne d'une petite quantité.

L'écrou reste immobile pendant que le cylindre enregistreur se meut et se déplace d'une petite quantité entre deux mouvements de celui-ci, afin que les tracés successifs ne se superposent pas.

Le fonctionnement de l'appareil est facile à concevoir : à l'instant où commence le mouvement du cylindre, la sonde commence à descendre, le style n'appuie pas sur le cylindre ; après un certain temps la sonde rencontre le mercure, le courant passe, l'électro-aimant agit, la palette est attirée et la pointe commence à marquer un trait.

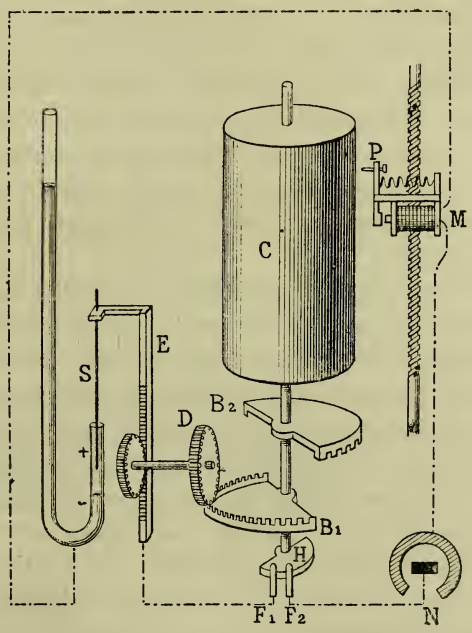


Fig. 541.

Le commencement de ce trait occupe par rapport à la génératrice initiale une position qui caractérise la hauteur barométrique puisqu'elle dépend de la position du niveau du mercure.

Le trait se continuerait jusqu'à la sortie de la sonde, il y aurait production d'une étincelle qui amènerait une oxydation du mercure ; pour l'éviter on interrompt le courant, toujours au même instant, à l'instant où la sonde est au point le plus bas de sa course. On obtient facilement ce résultat par l'interposition sur le trajet du circuit de deux frottoirs F_1 F_2 qui sont reliés par un commutateur demi-circulaire H dont le fonctionnement se comprend immédia-

tement. Il résulte de là que tous les traits doivent se terminer après une demi-révolution du cylindre, exactement par conséquent sur une même génératrice, ce qui fournit une vérification du bon fonctionnement de l'appareil.

Quand la révolution est terminée, tout mouvement s'arrête, l'écrou descend d'une quantité égale au pas de la vis, puis la même action se reproduit après une période d'arrêt qui est de 10 minutes, par exemple. On a donc ainsi une série de traits dont la longueur est déterminée par la pression barométrique.

En réalité, les traits sont d'autant plus longs que le niveau du mercure est plus élevé, c'est-à-dire que la hauteur barométrique est plus faible : comme ce serait là une disposition inverse de celle qui est généralement adoptée, le tracé ne se fait pas directement comme il a été indiqué. En réalité, le courant établi par le contact de la sonde et du mercure agit non sur l'électro-aimant du style, mais sur un relais qui rompt le circuit d'une pile locale quand le courant général s'établit, et inversement, ce qui renverse naturellement les indications du tracé.

Ajoutons encore que le commutateur est moins simple que nous ne l'avons dit : il comprend deux roues concentriques sur chacune desquelles s'appuie un frottoir. La jante de l'une d'elle est lisse, celle de l'autre présente des entailles régulièrement espacés, le frottoir correspondant est terminé par une arête vive et le courant s'interrompt quand cette arête pénètre dans une entaille ; il y a alors une interruption dans le trait. Les entailles ont été disposées de manière que ces interruptions correspondent à une hauteur déterminée, 1 millimètre par exemple. Par l'action du relais ce sera l'inverse qui se produira, il y aura seulement un point de tracé à chaque millimètre.

Disons, bien que cela soit sans intérêt au point de vue électrique, que M. Van Rysselberghe ne se proposait pas seulement d'obtenir un enregistrement au crayon mais qu'il employait un style pointu, un burin, qui agissait sur une feuille métallique recouverte d'un vernis de manière à avoir, après attaque par l'eau-forte, une planche gravée servant à l'impression.

665. — Indiquons les dispositions qui ont été adoptées pour l'enregistrement des autres données météorologiques en se basant sur le même principe général, mais avec des modifications nécessitées par la diversité des appareils.

Thermomètre et psychromètre. — En employant des sondes plongeant dans des thermomètres à mercure, l'un à boule sèche, l'autre

à boule humide, on aurait la température par les indications fournies par le premier appareil et l'état hygrométrique par la comparaison des deux indications.

Mais on ne peut laisser pénétrer la sonde dans le mercure parce que, à cause du faible diamètre du tube, la colonne mercurielle serait

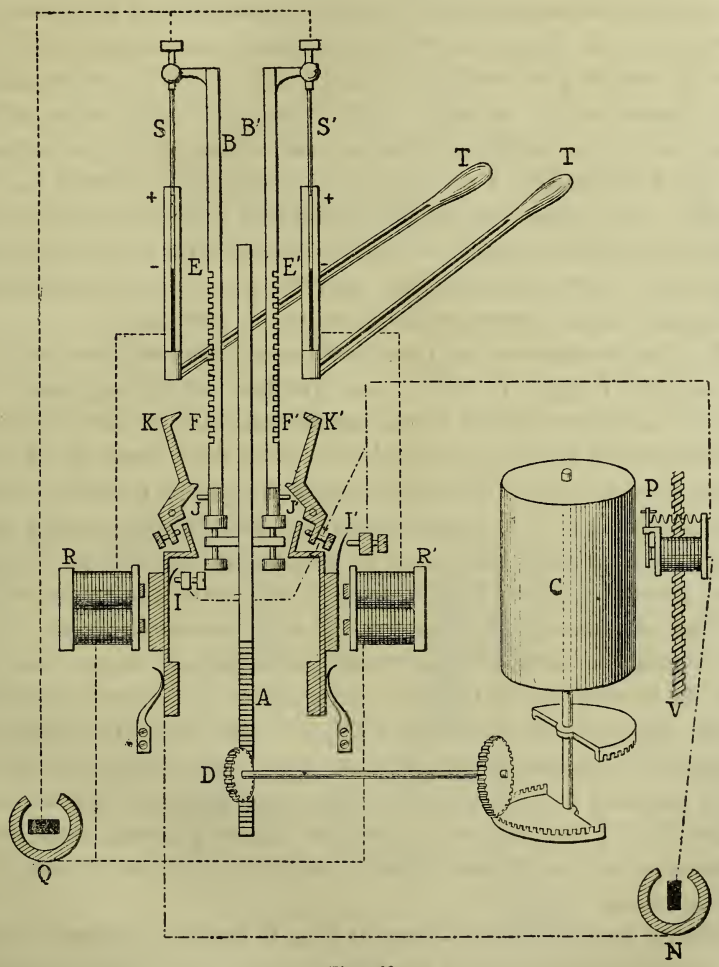


Fig. 542.

promptement divisée : il faut donc arrêter le mouvement de la sonde au moment où elle touche le mercure. D'autre part, pour établir aisément la comparaison entre les deux températures, le thermomètre sec T′ et le thermomètre mouillé qui marque toujours une température plus faible, on dispose l'appareil de manière qu'un

trait se produise tant que la sonde S n'a pas rencontré le mercure, que le trait cesse alors jusqu'à ce que la sonde S′ rencontre le mercure, puis qu'il se reproduise jusqu'à la cessation complète du courant : il y a donc un intervalle blanc qui représente la *différence* de température.

Voici la disposition (fig. 542) qui permet d'obtenir ces résultats : les tiges des thermomètres, d'abord horizontales, se redressent verticalement. A chacun de ces thermomètres correspond une sonde, S et S′, portée par une tige verticale, BEF et B′E′F′, présentant une fine denture vers sa partie inférieure. Ces tiges indépendantes l'une de l'autre s'appuient chacune sur une pointe de vis adaptée à la tige à crémaillère A mise en mouvement par la roue D. Ces deux sondes sont reliées au pôle + tandis que le mercure des thermomètres est relié au pôle — par l'intermédiaire d'un fil qui passe sur deux électro-aimants qui entrent en action respectivement lorsque la sonde correspondante touche le mercure.

Ces électro-aimants ont deux fonctions distinctes : lorsque l'électro-aimant R agit, il attire son armature dont l'extrémité bute contre une pièce mobile K qui bascule aussitôt et dont l'extrémité supérieure en forme de doigt pénètre entre deux dents de EF ce qui empêche cette tige et la sonde correspondante de descendre davantage; la tige E′F′ et la sonde continuent à descendre jusqu'à ce que cette dernière pièce soit venue au contact du mercure de T′ qui est à un niveau inférieur à celui de T. A cet instant, le même effet se produit absolument et le mouvement de la seconde tige est arrêtée; la crémaillère continue seule à descendre jusqu'à ce que change le sens de la rotation de D, elle remonte alors et revient nécessairement repousser les deux tiges EF, E′F′ qui remontent également jusqu'à leur position extrême; avant que cette position soit atteinte, deux taquets J et J′ portés par ces tiges ont agi sur les pièces basculantes K et K′ et les ayant ramenées à leur position primitive, le système se trouve disposé dans les conditions où il se trouvait avant l'observation.

D'autre part les électro-aimants R et R′ agissent comme relais. Il y a en effet un circuit local comprenant une pile N et dont fait partie l'électro-aimant du style P, circuit formant dérivation d'un côté par un fil aboutissant à la palette de l'électro-aimant R, de l'autre par un second fil aboutissant à la palette de R′. La première dérivation est fermée en I quand R n'est pas en action et ouverte quand il est traversé par un courant; c'est l'inverse qui a lieu pour R′.

Ceci posé, on voit que dès que la roue D commence à tourner, le

courant de N passe par la première dérivation en I et le style fait un trait. La sonde S rencontre le mercure de T, le courant de Q passe en R, la tige EF est immobilisée, il y a rupture de la dérivation en I,

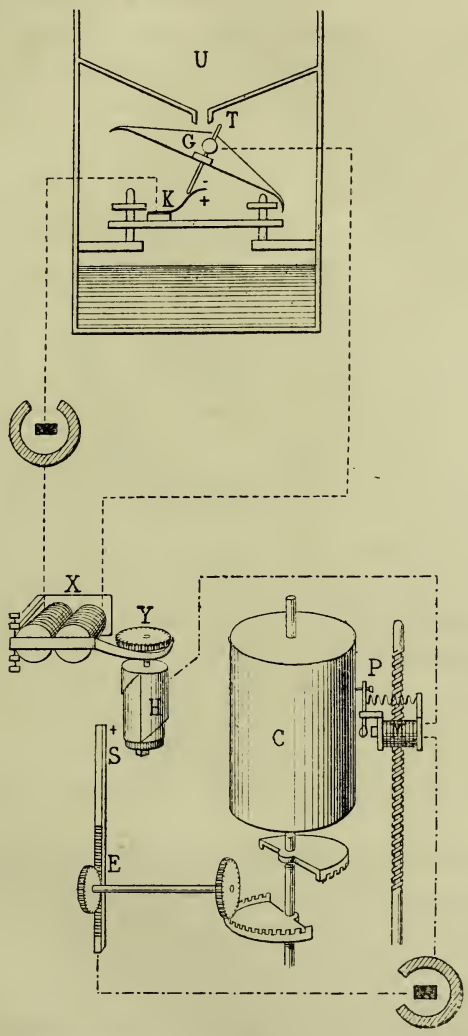


Fig. 543.

le style s'écarte du cylindre; quelques instants après, la sonde S′ rencontre le mercure de T′, le courant de Q passe en R′, la pièce K′ bascule, la tige E′F′ est immobilisée; en même temps le courant s'établit par I′ dans la deuxième dérivation et le style s'applique

contre le cylindre pour faire un trait qui se prolonge jusqu'au moment où tout courant est interrompu.

666. *Udomètre.* — L'eau provenant de la pluie est recueillie dans un udomètre ou pluviomètre formé par un entonnoir U (fig. 543) qui amène l'eau au-dessus d'une bascule à augets G qui s'incline alternativement dans un sens et dans l'autre, chaque fois qu'il est tombée une couche d'eau de 1 millimètre (qui d'après les dimensions de l'entonnoir représente 10 grammes). Chaque oscillation ferme un circuit comprenant une pile et un électro-aimant X qui agit sur une palette terminée par un doigt qui est en contact avec une roue à rochet Y qui avance d'une dent pour chaque millimètre d'eau tombée. La roue à rochet est solidaire d'un cylindre vertical H présentant en relief à sa surface une pièce métallique terminée en hélice, qui est en communication avec le pôle — de la pile tandis que le pôle + est relié à une tige verticale S mise en mouvement par la roue D et portant à son extrémité supérieure un doigt métallique. La tige est placée de manière à rencontrer la surface du cylindre H et le courant s'établit tant que le doigt S touche une partie métallique; à ce moment le courant passe et le style fait un trait qui cesse lorsque le courant est interrompu. La longueur du trait est proportionnelle à la longueur de la partie de génératrice métallique parcourue par le doigt fixé en S; cette longueur est elle-même proportionnelle à l'angle dont a tourné le cylindre et, par suite, à la quantité d'eau tombée.

667. *Girouette.* — On se propose de déterminer la direction du vent d'après la position de la girouette; la disposition adoptée permet de préciser 8 directions principales et les 8 directions intermédiaires. Elle pourrait s'appliquer à un nombre quelconque de directions.

Un disque métallique PQ (fig. 544) est lié invariablement à l'axe A de la girouette de manière à tourner avec celle-ci; il porte un secteur de verre N′ correspondant à 1/8 de la circonférence et dont le milieu donne précisément la direction de la girouette; d'autre part une couronne isolante fixe, en bois, placée au-dessous du disque métallique porte neuf frottoirs dont les extrémités viennent s'appuyer sur le disque métallique; huit d'entre eux correspondent aux directions des points cardinaux (N., N.-O., O., S.-O., etc.); lorsque le disque tourne, le secteur de verre vient passer nécessairement sous chacun d'eux; ses dimensions sont telles évidemment qu'il est toujours en prise au moins avec l'un de ces frottoirs et qu'il peut être en contact avec deux consécutifs au plus.

Chacun de ces frottoirs correspond par un fil avec une pièce métallique incrustée dans une tige isolante sur laquelle vient frotter un ressort F′ porté par une tige CD qui reçoit de l'horloge un mouvement comme toutes les sondes déjà décrites; cette tige est en rapport avec le pôle + de la pile.

Le neuvième ressort R qui est relié au pôle — s'appuie sur le disque métallique de manière à ne pas rencontrer le secteur de verre.

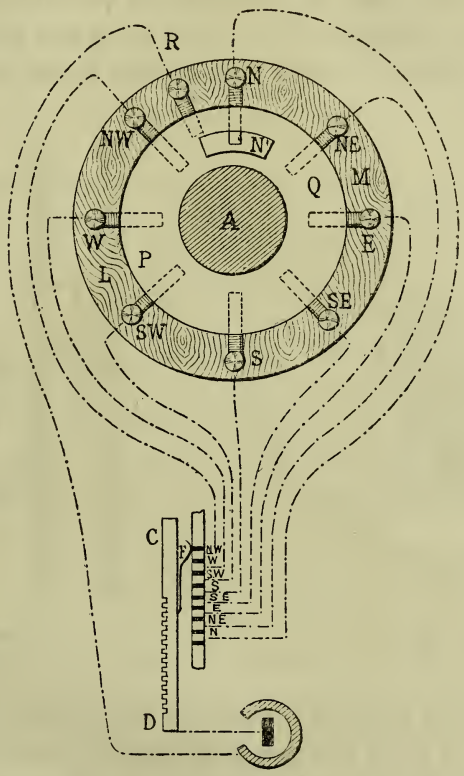


Fig. 544.

Lorsque le ressort F passe sur la tige fixe et rencontre successivement les pièces métalliques, le courant s'établit et par suite un trait se produit sur le cylindre pour chacune de ces pièces qui ne touche pas le secteur de verre. Il y a au contraire interruption du trait lorsque le ressort F passe sur la pièce qui correspond à la direction d'où souffle le vent, puisque le contact correspondant est alors sur le secteur de verre. S'il s'agit d'une position intermédiaire,

deux frottoirs voisins touchent le secteur de verre et le trait manque sur une longueur double.

668. *Anénomètre.* — La vitesse du vent est déterminée à l'aide d'un anémomètre de Robinson, c'est-à-dire que l'appareil inscrit le nombre de tours effectués dans l'intervalle de 10 minntes.

L'anémomètre, à chaque tour, envoie un courant dans un circuit qui comprend un électro-aimant dont nous expliquerons tout à l'heure l'action. A cet effet, l'axe A (fig. 543) passe au centre d'un disque isolant sur lequel est une pièce KL pressée par un ressort contre une roulette isolante R; ce levier porte une pièce de verre I qui le sépare à l'état de repos d'un ressort R_1 qui correspond au

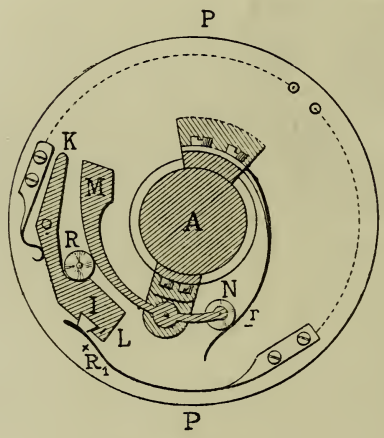


Fig. 543.

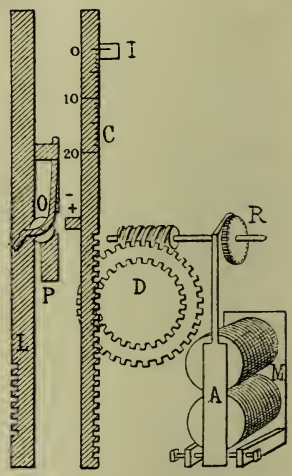


Fig. 543 *bis.*

pôle + d'un circuit comprenant une pile tandis que le levier KL est relié au pôle —. A l'état de repos le courant ne passe donc pas.

D'autre part, l'axe A entraîne dans sa rotation une sorte de marteau MN qui, par l'action d'un ressort *r* agissant sur un galet N est appliqué contre la roulette R lorsque l'anémomètre tourne : la roulette agissant sur NM l'écarte de sa position d'équilibre, en tendant le ressort *r* jusqu'à ce que l'extrémité M dépasse la roulette, le ressort *r* se débande brusquement, il y a choc de M sur l'extrémité L du levier KL et, par suite de ce choc, un contact instantané s'établissant entre L et le ressort P, le circuit est fermé et le courant passe.

Cette disposition a dû être employée afin d'éviter que l'anémo-

mètre restant au repos dans une position particulière le courant ne passât d'une manière continue ; tandis que, ainsi, il ne peut y avoir de courant qu'après chaque tour réellement effectué, et le courant cesse aussitôt, quelle que soit la position de l'anémomètre.

Le courant ainsi envoyé par l'anémomètre passe dans un électro-aimant M (fig. 545 *bis*) qui, par l'intermédiaire de la palette A, agit surune roue à rochet qui avance ainsi d'une dent à chaque tour de l'anémomètre. La roue à rochet, à l'aide d'une vis sans fin et de roues dentées, fait monter une tige C dont le déplacement est ainsi proportionnel au nombre de tours de l'anémomètre pendant le temps considéré : cette tige porte un doigt qui correspond au pôle + de la pile placée dans le circuit qui contient l'électro-aimant du style inscripteur.

A côté de cette tige se meut, sous l'action du système moteur une tige L portant également un doigt O qui est relié au circuit. Celui-ci n'est pas fermé au repos, ni lorsque cette tige commence à descendre; il l'est seulement, et alors commence l'enregistrement, au moment où le doigt O rencontre la pièce C. La tige L dans son mouvement descendant entraîne la crémaillère C et la ramène à sa position initiale, parce que la roue qui commande la crémaillère est montée à frottement doux sur son axe. Le trait produit se continue pendant tout le temps de la descente, sa longueur est donc proportionnelle à l'élévation de la crémaillère C et par suite au nombre de tours de l'anémomètre.

669. — Nous avons supposé tout d'abord que l'enregistrement pour chaque appareil de mesure, y compris le retour à la position de repos correspondait à un tour du cylindre enregistreur. En réalité, il n'en est pas ainsi, et chaque enregistrement correspond seulement à une fraction de tour de manière que la série des tracés d'une même observation se fait sur une même ligne qui se déroulera en ligne droite. Au commencement de chaque tour, c'est-à-dire toutes les 10 minutes, le style descend d'une quantité déterminée et aussitôt après commencent les enregistrements qui se succèdent dans un ordre déterminé qui ne présente rien de particulier à signaler.

La régularité des mouvements qui est désirable est maintenue par l'action d'un régulateur : elle n'est pas cependant indispensable, comme cela serait si les grandeurs à mesurer étaient données directement par les longueurs des traits puisque, sur chaque tracé, des interruptions permettent d'évaluer les grandeurs par le nombre même des interruptions.

Il est à remarquer qu'il n'est pas nécessaire que l'enregistrement se fasse à l'endroit où sont les appareils de mesure; il faut et il suffit pour que le météorographe puisse fonctionner à une distance quelconque :

1° Que le mouvement du cylindre enregistreur et celui des *sondes* des divers appareils de mesure soient dépendants les uns des autres comme s'ils étaient reliés matériellement ;

2° Que les courants établis par le fonctionnement de chaque appareil parvienne à l'électro-aimant de l'enregistreur.

Cette dernière condition est aisément réalisée par l'établissement d'un fil conducteur reliant le système des mesureurs à l'enregistreur.

La première est obtenue par l'établissement de mouvements synchrones à l'aide de deux horloges munies de régulateurs; le départ se produisant au même instant par l'action de l'émission d'un courant qui produit le déclenchement des organes mobiles.

670. Météorographes d'Olland, de Théorell. — Nous ne pouvons entrer dans des détails sur les divers météorographes qui ont été imaginés et nous nous bornerons à quelques rapides indications sur deux appareils intéressants.

Dans le météorographe d'Olland les indications des appareils sont données par le déplacement d'une aiguille sur un cadran : baromètre à poids agissant sur le fléau d'une balance, thermomètre métallique, etc. Le cadran porte une série de dents en relief et fait partie du circuit : à l'heure de l'observation, un index chercheur parcourt le cadran en appuyant sur les dents et envoyant dans la ligne et au récepteur un courant à chaque dent qu'il rencontre ainsi qu'un au moment où il rencontre l'aiguille indicatrice. Au récepteur, la position de cette aiguille sera donc déterminée par la position occupée par la trace du courant qui lui correspond par rapport aux traces des courants envoyés successivement par les dents.

Dans le météorographe de Théorell, on emploie des sondes comme dans l'appareil de M. Van Rysselberghe; seulement le mouvement de ces sondes est lié dans l'appareil enregistreur à celui de roues qui portent à leur périphérie des caractères d'imprimerie représentant des chiffres, de manière que les chiffres qui se trouvent au point le plus bas, lorsque la sonde rencontre le mercure et arrête le mouvement en établissant le courant représentent précisément le nombre qui correspond à l'observation. Il existe autant de systèmes de roues qu'il y a d'instruments observés et, à l'instant de chaque observation, ces diverses roues sont amenées successivement à la po-

sition qu'elles doivent occuper; puis l'impression se fait pour toutes les roues en même temps, après quoi elles sont ramenées à leur position de repos.

671. Contrôleurs des disques pour chemins de fer. — L'électricité a été appliquée dans un grand nombre de circonstances pour assurer l'exploitation des chemins de fer, non seulement, comme nous l'avons indiqué déjà, en permettant à un agent de transmettre des signaux déterminés, mais aussi en rendant possible la production automatique de signaux ayant un caractère conventionnel. Nous ne saurions indiquer tous les cas où ces signaux peuvent être utiles, non plus que toutes les solutions qui ont été proposées ou adoptées, et nous nous bornerons à quelques exemples.

Les gares et certaines sections de la voie sont protégées par des *signaux avancés*, disques ronds ou carrés qui peuvent se placer *parallèlement* à la voie, indiquant alors que les trains peuvent

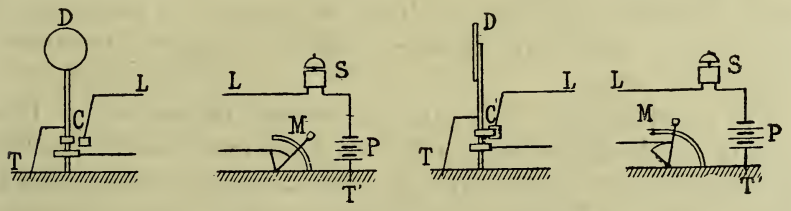


Fig. 546 et 547. — Contrôleur des disques.

passer; ou *perpendiculairement* à la voie, commandant un arrêt ou tout au moins un ralentissement. Ces disques sont manœuvrés à distance par l'intermédiaire de tiges métalliques ou de fils de fer qui peuvent atteindre une grande longueur, 1200 mètres et quelquefois plus : il est indispensable que lorsque, à la gare, on a agi sur le levier dont le mouvement doit entraîner la rotation du disque, on soit assuré que ce mouvement s'est effectivement produit et qu'il n'a pas été empêché par une rupture du fil ou un obstacle quelconque. Si la distance est grande et surtout si la voie présente une courbe, le disque ne peut être vu de la gare; on a alors recours à l'électricité pour donner l'indication de la position du disque.

A cet effet, on établit à la gare une sonnerie S (fig. 546 et 547) communiquant d'une part avec une pile P dont l'autre pôle est à la terre et d'autre part avec un fil porté par des supports isolés qui vient se terminer près du disque D. Celui-ci porte un commutateur C relié à la terre et qui lorsque le disque indique l'arrêt (fig. 547)

vient compléter le circuit : le courant s'établit alors et la sonnerie tinte tant que le disque conserve cette position, mais lorsque le disque tourne, rendant la voie libre (fig. 546), le commutateur C rompt la communication, la ligne reste isolée et la sonnerie cesse.

Dans quelques cas on utilise le courant qui se produit pour mettre en mouvement à la gare un appareil, répétiteur optique, dans lequel par un signal déterminé on est renseigné à chaque instant sur la position du disque.

Il y a des différences assez grandes sur la manière dont le contact s'établit : tantôt c'est une lame de ressort montée sur l'arbre du disque et qui, en tournant, s'écarte ou s'approche d'un contact relié à la ligne et porté par un isolateur; ce peut être un ressort frottant sur une pièce circulaire mobile avec l'arbre du disque et comprenant un secteur isolant et un secteur métallique relié à la ligne, ce qui assure un meilleur contact.

On peut évidemment varier beaucoup les moyens d'établir la communication qui ferme le circuit et provoque le tintement de la sonnerie; mais d'une manière générale, l'appareil fonctionne toujours de même.

672. Contrôle de l'éclairage des disques ; photoscope. — Pendant la nuit le disque est invisible ou à peu près, mais sa position est indiquée par une lanterne qui présente un feu blanc quand la voie est libre et donne un feu rouge lorsque la voie est fermée, parce que le disque porte une ouverture garnie d'un verre rouge qui vient se placer devant la lanterne. Pour que le signal soit vu, il ne suffit pas alors que le disque ait la position convenable, il faut encore évidemment que la lanterne soit allumée. On le voit directement de la gare quand le disque n'est pas trop éloigné et que la voie est rectiligne ; mais on n'est plus renseigné dans le cas contraire. On peut être averti si la lampe s'éteint par l'emploi d'un appareil électrique appelé *photoscope*. Il consiste essentiellement en une spirale bimétallique A (fig. 548) de cuivre et d'acier placée à la partie supérieure de la cheminée C de la lampe ; l'extrémité centrale est invariablement fixée, l'extrémité périphérique D qui se prolonge rectilignement en dehors de la cheminée est placée dans le voisinage de deux lames de ressort E F formant contact. Lorsque la lampe n'est pas allumée, le contact n'existe pas, le courant ne peut passer; mais quand la lampe brûle, la chaleur dégagée fait courber la spirale et son extrémité libre D presse contre les ressorts et les amène au contact, établissant ainsi la communication qui met la sonnerie en mouvement à la gare.

En réalité, l'appareil est disposé de manière à ce qu'il ne faille pas un fil spécial pour son fonctionnement ; il utilise le fil même qui indique la position du disque. Mais il se présentait une difficulté résultant de ce que, pendant la journée la sonnerie doit fonctionner sans que la lampe soit allumée : on y a obvié par l'emploi du *disjoncteur*. Le fil L (fig. 549) qui, partant de la sonnerie, aboutit au commutateur C du disque est interrompu à la hauteur où doit se fixer la lanterne et porte deux ressorts A B qui s'appuient l'un contre l'autre et laissent normalement passer le courant. La lanterne porte d'autre part un coin isolant D portant une lame métallique E F sur chaque face, chaque lame étant reliée aux contacts du photoscope P et P′ ; lorsqu'on monte la lanterne, le coin vient passer entre les deux ressorts et rompt le circuit qui ne peut se compléter que par les lames du photoscope. Pour que la sonnerie fonctionne il faudra

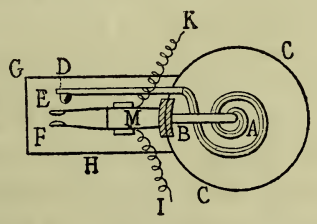


Fig. 548. — Photoscope.

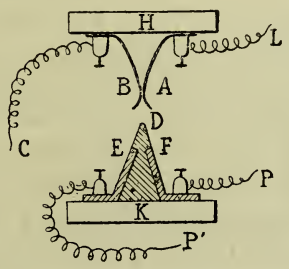


Fig. 549. — Disjoncteur.

donc que le disque soit tourné à l'arrêt, ce qui établit la communication à la partie inférieure et que la lanterne soit allumée ; c'est-à-dire que lorsque le tintement se produira, on pourra être assuré que le disque est dans des conditions qui garantissent effectivement la gare.

Il peut arriver qu'un disque puisse être manœuvré de divers points, ou que, pour une cause quelconque, on doive être averti en plusieurs points de la position du disque. On pourra établir sur le mât de manœuvre autant de commutateurs qu'on le désirera, ou on pourra utiliser des dispositions variées plus ou moins analogues à celles que nous avons indiquées en parlant des sonneries en général.

673. Sifflet électromoteur ; manœuvre automatique des freins. — Il ne suffit pas évidemment qu'un disque soit à la position convenable et que, pendant la nuit la lanterne soit allumée, il faut

encore que les agents l'aient vu avant le moment où ils l'atteignent ou à ce moment même. Il serait bon qu'ils fussent avertis de la position qu'avait ce disque s'ils l'avaient dépassé sans le voir ; il serait avantageux aussi que, dans le cas où ce disque commande l'arrêt absolu, les freins du train fussent actionnés automatiquement, sans l'intervention des agents; on réduirait ainsi dans une grande mesure les causes d'accidents.

Le Chemin de fer du Nord a établi sur certains points de son réseau des appareils imaginés par MM. Lartigue, Forest et Digney et qui satisfont à ses diverses conditions. Ces appareils présentent à considérer les organes situés sur la locomotive et ceux qui servent à établir le courant.

L'orifice A (fig. 550) qui amène la vapeur dans le sifflet est fermé par une soupape B reliée à une tige BC dont l'extrémité est articulée à un levier DE; à son extrémité celui-ci porte une autre tige F qui sous l'action d'un ressort puissant K tend à incliner le levier et à déboucher l'orifice; mais cette tige est reliée d'autre part à une palette de fer doux HI mobile en H et qui s'appuie contre un électro-aimant Hughes L; elle est maintenue en place par l'attraction du noyau qui est fortement polarisé par un aimant permanent M qui l'immobilise et maintient ainsi la fermeture de la prise de vapeur. Mais si un courant de sens convenable vient à traverser le fil de l'électro-aimant, il annulera l'action du noyau, la tige FG sera rendue libre et le système tout entier obéissant à l'action du ressort K, l'orifice de la prise de vapeur sera ouvert et le sifflet entrera en action : le sifflement continuera tant que, à l'aide d'une manette N, le mécanicien n'aura pas ramené le levier DE à sa position primitive et le fer doux en contact avec le noyau où il restera fixé si le courant a cessé d'agir.

On conçoit, sans qu'il soit nécessaire d'insister, qu'une disposition entièrement analogue pourrait être adaptée à une soupape ou un robinet qui commanderait l'action d'un frein automatique (à vide ou à air comprimé).

674. — Le fonctionnement de ces appareils se produit donc simplement dès qu'un courant vient à les traverser : il faut que ce courant s'établisse lorsque la locomotive arrive en face du signal ou à quelque distance. Pour cela, on établit au milieu de la voie une pièce de bois de 2 mètres de longueur environ, un peu au-dessus du sol, mais au-dessous du niveau de toutes les pièces de la machine ; cette pièce porte un enduit isolant et une plaque métallique reliée par un fil au pôle + d'une pile placée près du disque; cette pièce est précédée d'une autre appelée *bouclier* et formant plan incliné. Le cen-

drier de la machine porte une brosse métallique qui aborde sans choc la feuille métallique, à cause de la présence du bouclier, et qui est reliée à l'électro-aimant dont le fil par l'autre extrémité communique au sol par l'ensemble de la machine et les rails. Le pôle — de la pile locale est reliée au commutateur fixé sur l'arbre du mât et de là à la sonnerie et de la terre. Lorsque la voie est libre le disque est effacé, la locomotive passe, le courant ne s'établit pas, rien ne fonctionne. Mais si le disque est à l'arrêt, le commutateur agit et quand la locomotive passera le courant s'établira, traversera l'électro-aimant et fera fonctionner le sifflet ou le frein automatiquement.

675. Enclenchement électrique des signaux et des aiguilles. — Il arrive fréquemment que divers appareils ne doivent fonctionner

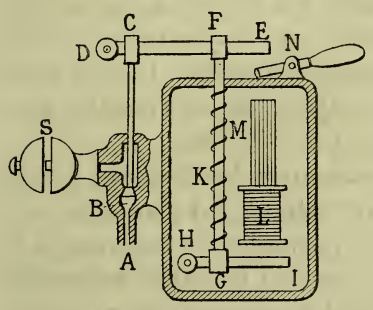


Fig. 550. — Sifflet électromoteur.

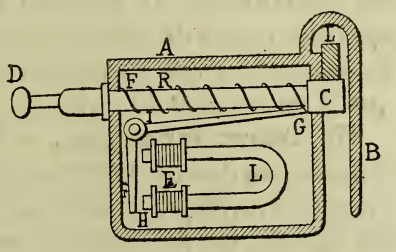


Fig. 551. — Verrou électrique.

que suivant un ordre déterminé; un disque permettant le passage à une bifurcation ou un croisement ne devant, par exemple, se manœuvrer que si l'on a fermé la voie sur les autres lignes, ou bien encore la manœuvre d'une aiguille ne devant avoir lieu que si l'on a amené à la position convenable les disques qui se trouvent sur les diverses voies qui y aboutissent. On a résolu le problème de diverses façons et notamment en établissant des liaisons mécaniques entre les leviers qui font mouvoir les aiguilles et les disques. Mais on peut avoir recours à l'électricité pour établir ces liaisons nécessaires ; pour cela, on munit les pièces mobiles de *verrous électriques* ou *serrures électriques* dont on a imaginé de nombreuses formes. Nous en décrirons un modèle appliquée par M. Regnault à son appareil de *block-système.*

Une boîte en fonte A (fig. 551) porte latéralement une coulisse B dans laquelle pénètre la tige L d'un levier de manœuvre lié à l'aiguille

ou au disque dont il s'agit. Un pène C, que l'on fait mouvoir à l'aide d'une poignée extérieure D, repoussé par un ressort R s'oppose, à l'état de repos, au mouvement du levier qui n'est possible que quand ce pène est effacé malgré l'action du ressort. Mais ce mouvement n'est pas toujours possible, parce qu'un levier IG vient buter par son extrémité contre le pène et empêche tout déplacement : ce levier est immobilisé dans cette position parce que son autre bras IH est maintenu contre un électro-aimant Hughes. Quand celui-ci est traversé par un courant de sens convenable, le levier obéissant à un ressort antagoniste *r* s'écarte de l'électro-aimant, son extrémité opposée libère le pène que l'on peut alors repousser, ce qui permet le mouvement du levier. Celui-ci n'est donc possible que si un courant traverse l'électro-aimant : on dispose cet électro-aimant dans un circuit comprenant une pile et où existent autant d'interruptions qu'il existe d'appareils qui doivent être liés à celui qui dépend de la serrure ; ces interruptions se trouvent fermées par le jeu même de ces appareils lorsqu'ils sont dans une position favorable. Il suffit alors, évidemment, qu'un seul appareil ne soit pas dans cette position pour que le mouvement du levier ne puisse pas avoir lieu.

676. Disques électriques. — La manœuvre des disques à grande distance, au delà de 1200 mètres par exemple, est peu aisée ; on a proposé d'employer les courants pour provoquer le mouvement de ces signaux. On ne demande pas au courant le travail mécanique nécessaire à la manœuvre, mais on l'utilise seulement pour produire l'enclenchement et le déclenchement d'un rouage d'horlogerie au moment opportun. On peut disposer le circuit de manière que lorsque le mouvement s'est produit un signal spécial soit fait à la station qui commande la manœuvre. On comprend qu'il est aisé, dans ce système, de relier le disque considéré à d'autres disques ou à des aiguilles, en s'arrangeant comme nous l'avons expliqué pour que le circuit ne soit fermé et par conséquent que la manœuvre ne puisse s'effectuer que lorsque tous les autres appareils sont dans la position convenable.

En général les appareils sont disposés de manière à mettre le disque à l'arrêt automatiquement par la rupture du circuit ; il en résulte, que si, pour une cause quelconque, il y a un dérangement dans le circuit et que le courant cesse de passer, le disque se mettra à l'arrêt, il ne pourra donc résulter aucun inconvénient autre qu'un retard dans la marche des trains. D'autre part, les courants qui pourraient prendre naissance par suite de l'action atmosphérique sont sans inconvénient ; ils ne peuvent agir si le disque indique

l'arrêt, puisque alors le circuit est ouvert; quand le circuit est fermé, ils ne modifient pas la position du disque qui indique voie libre, s'ils sont dans le même sens que le courant de l'appareil; s'ils sont en sens contraire et suffisants pour l'annuler, ils produisent il est vrai le mouvement du disque, mais celui-ci se met à l'arrêt, ce qui ne peut amener aucun accident.

En France les disques manœuvrés par l'électricité n'ont pas été employés, si ce n'est à l'état d'essai; nous ne croyons donc pas utile d'insister davantage.

677. Contrôle des aiguilles manœuvrées a distance. — Il est utile, lorsqu'une aiguille est manœuvrée à distance par l'intermédiaire de tiges et de leviers, de s'assurer qu'elle a bien pris absolument la position qu'elle doit occuper et qui amène le passage du train sur la voie convenable; si le mouvement de l'aiguille était

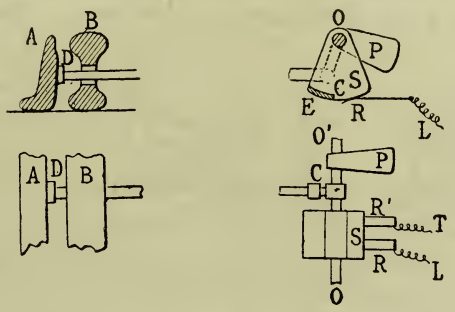


Fig. 552 et 553. — Contrôleur d'aiguille; coupe et plan.

gêné plus ou moins complètement par une cause quelconque, il en pourrait résulter un déraillement; s'il ne s'était pas produit, le train s'engagerait sur une voie qu'il ne doit pas suivre. L'emploi de courants électriques permet de fournir à cet égard des renseignements certains à une distance quelconque. On conçoit, en effet, qu'il suffit de relier les pièces mobiles à des appareils, à des commutateurs par exemple qui fermeront un circuit comprenant une sonnerie seulement quand l'aiguille a pris exactement la position qu'elle doit occuper.

Le contrôleur de M. Chaperon (fig. 552 et 553) consiste en un secteur isolant S présentant une partie métallique E et contre lequel frottent deux ressorts R R'; le fil de la ligne L qui comprend la pile et la sonnerie est reliée à l'un de ces ressorts, tandis que l'autre T est mis à la terre. Le circuit est ouvert et le courant ne passe pas

tant que les ressorts frottent sur la partie isolante; le courant s'établit, et par suite la sonnerie entre en action, lorsque les ressorts sont en contact avec la pièce métallique E.

Le secteur isolant est monté sur un arbre horizontal OO′ qui porte une manivelle OC dont l'extrémité est articulée avec une tige horizontale CD qui traverse le rail B et dont la tête vient buter contre la lame de l'aiguille A, pièce mobile. Quand celle-ci est appliquée exactement contre le rail pour le passage d'un train, elle repousse la tige qui entraîne la manivelle et fait tourner l'axe, la pièce métallique arrive alors au contact des ressorts, le courant s'établit. Lorsque l'aiguille s'écarte du rail, un contrepoids P monté sur l'arbre le fait tourner en sens contraire ainsi que le secteur et le courant est rompu.

678. — M. Lartigue a imaginé une disposition très différente et qui permet de vérifier simultanément et avec un seul circuit si les parties mobiles des deux côtés de la voie ont bien les dispositions qu'elles doivent avoir. L'organe essentiel est une boîte en ébonite

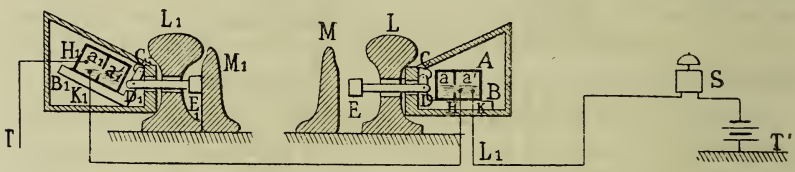


Fig. 554. — Contrôleur d'aiguille.

B(fig. 554) montée sur une pièce métallique mobile autour de sa partie supérieure C et reliée à une tringle horizontale DE qui traverse le contre-rail : cette pièce est sur le côté extérieur de celui-ci. La boîte entièrement fermée est partagée en deux *a a′* par une cloison percée d'une petite ouverture; deux fils de platine H K pénètrent dans la boîte dans le compartiment externe. Quand la boîte est horizontale, ils sont baignés dans le mercure et s'ils font partie d'un circuit, le courant peut s'établir; quand la boîte est inclinée, une partie du mercure est dans le compartiment interne, l'un des fils est en dehors de ce liquide, il y a interruption de circuit, le courant ne peut passer. Lorsque la boîte passe de la position horizontale à la position inclinée, le courant ne cesse pas immédiatement, parce que, à cause de l'étroitesse de l'orifice, le mercure met un certain temps à s'écouler.

Les tringles qui traversent les rails ont une longueur telle que les boîtes sont horizontales quand l'aiguille est écartée du rail

corrrespondant et qu'elles sont inclinées quand l'aiguille est arrivée au contact.

Enfin à l'une des boîtes un fil de platine H_1 est à la terre, l'autre K_1 est relié par un conducteur à l'un des fils de platine H de la seconde boîte et l'autre fil K de celle-ci communique avec le circuit qui comprend la sonnerie S et la pile.

Dès lors on reconnaît que lorsque les aiguilles occupent exactement l'une ou l'autre des positions extrêmes qu'elles peuvent avoir, l'une d'elles étant en contact exact avec le rail correspondant, le circuit est interrompu, la sonnerie ne peut fonctionner. Lorsque l'on passe d'une position à l'autre la boîte qui était inclinée devient horizontale, les deux fils sont au contact du mercure et le courant peut passer ; la boîte qui était horizontale et dans laquelle le courant pouvait passer s'inclinera, mais, à cause de l'écoulement lent du mercure, il n'y aura pas instantanément rupture du circuit; pendant un certain temps, le circuit ne présentera pas d'interruption, le courant s'établira, la sonnerie tintera; mais cette action sera passagère, car le mercure passant dans le compartiment interne de la boîte qui s'est inclinée un des fils de platine se trouvera hors du liquide.

Si, pour une cause quelconque, les aiguilles occupent une position intermédiaire, les deux boîtes restent horizontales, il ne se produit pas d'interruption de circuit, la sonnerie tinte constamment. Cette sonnerie annonce un dérangement, tandis que, au contraire, on est averti que tout est en bon état lorsque la manœuvre des leviers qui commandent l'aiguille est accompagnée d'un tintement qui n'a qu'une durée limitée. S'il n'y avait pas de tintement, c'est qu'il y aurait un dérangement dans un des organes, et il y aurait lieu de procéder à une vérification.

Si un poste commande plusieurs aiguilles, on peut n'avoir qu'une seule sonnerie; mais un galvanomètre est placé dans chaque circuit et permet de reconnaître quelle est l'aiguille dont la manœuvre a provoqué la mise en action de la sonnerie.

679. Protection électro-automatique des trains. — On a cherché enfin à ce que les trains sur leur passage même fournissent à distance des indications sur la position qu'ils occupent ou qu'ils fassent manœuvrer automatiquement les appareils destinés à les protéger.

En principe, l'idée est simple : il suffit que le passage du train en un point déterminé provoque l'établissement d'un courant dans un circuit. Ce courant peut être utilisé à faire à la gare prochaine

un signal annonçant l'arrivée du train; il peut servir à faire mouvoir des disques électriques qui couvriront le train.

Si l'on a établi une disposition de ce genre en plusieurs points limitant des sections, on conçoit que, dans les gares entre lesquelles circule le train, on pourra être renseigné sur la marche du train, sur le point où il se trouve à chaque instant. On pourra utiliser le courant produit en un point à manœuvrer des signaux dont l'un bloque la section dans laquelle le train entre et dont l'autre débloque la section précédente, etc.

On comprend aisément la sécurité absolue que procureraient ces dispositions si l'on pouvait compter sur le fonctionnement certain des appareils; il ne saurait alors y avoir d'erreurs provenant d'omissions de la part des employés ou d'ordres mal compris, mal exécutés, surtout si l'on y joignait le sifflet électromoteur et le déclenchement automatique des freins continus (673). Seule la communication télégraphique ou téléphonique entre les trains en marche et les gares ou entre deux trains en marche pourrait amener une aussi grande sécurité.

La réalisation de cette idée est beaucoup moins simple qu'elle ne paraît et la fermeture d'un circuit par le passage d'un train présente des difficultés très réelles dans la pratique.

L'idée la plus simple consiste évidemment à disposer une pédale qui soit abaissée par le passage des roues et dont le mouvement provoque la fermeture du circuit et par suite l'établissement du courant.

Une première difficulté consiste dans la multiplicité des chocs que reçoit la pédale qui est rencontrée par chaque roue du train. On est parvenu à lever cette difficulté en soustrayant la pédale au choc des roues autres que la première : à cet effet, par exemple, la pédale AB (fig. 555) est reliée à un levier dont l'extrémité soulève un soufflet; ce soufflet est muni d'une soupape qui, dans ce mouvement, laisse librement pénétrer l'air, mais qui se ferme dès que le mouvement descendant commence : l'air s'écoule alors seulement par un petit orifice calculé de manière que le soufflet n'arrive au bas de sa course et que, par suite, la pédale ne soit relevée qu'après un temps plus considérable que celui qui correspond au passage d'un train.

Bien que le procédé soit appliqué en un certain nombre de points, on peut craindre que le choc même d'une seule roue ne puisse amener des dérangements dans l'appareil, aussi son emploi ne s'est-il pas généralisé.

On obtient un meilleur résultat en n'utilisant pas l'action des roues sur une pièce mobile, et en se servant pour fermer le circuit de la flexion que subissent les rails au moment où passe le train.

680. — Enfin une solution simple, qui paraît entièrement pratique et qui, dans les premiers essais qui durent depuis près d'un an a donné des résultats satisfaisants, a été indiquée par M. de Baille-

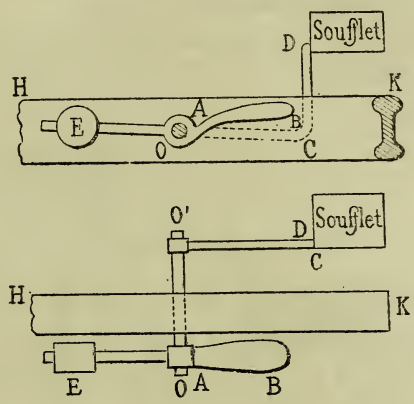


Fig. 555.

hache. Elle n'exige l'adjonction d'aucune pièce à la voie; seulement un rail C (fig. 556) est monté d'une manière spéciale au point où le passage du train doit produire l'établissement du courant dans le circuit. Ce rail est isolé de la terre et des rails voisins A B : pour atteindre ce résultat, il est séparé des coussinets sur lesquels il repose par une feuille de cuir recouverte d'une lame de gutta-percha.

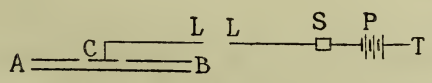


Fig. 556.

Le circuit PSL vient aboutir à ce rail : aucun courant ne peut s'y établir puisque le rail est isolé et que le circuit n'est pas fermé. Mais quand vient à passer un wagon ou un train, le circuit se complète par les roues et les essieux et va se fermer sur l'autre rail qui communique à la terre, le courant passe alors et les appareils placés dans le circuit entrent en action.

Il n'y a, on le voit, aucune pièce susceptible de dérangement,

d'une part; d'autre part, le fonctionnement paraît assuré car quelque soit l'état du rail le passage des roues d'une locomotive établit un excellent contact métallique.

En réalité, l'isolement n'est jamais parfait et un courant faible traverse toujours le circuit; mais son intensité n'est pas comparable à celle qu'il atteint quand le contact métallique se produit. Il faut donc seulement régler les appareils de telle sorte qu'ils ne fonctionnent pas sous l'influence d'un faible courant.

Cette disposition fort ingénieuse paraît susceptible de donner la solution d'un grand nombre de problèmes qui intéressent l'exploi-

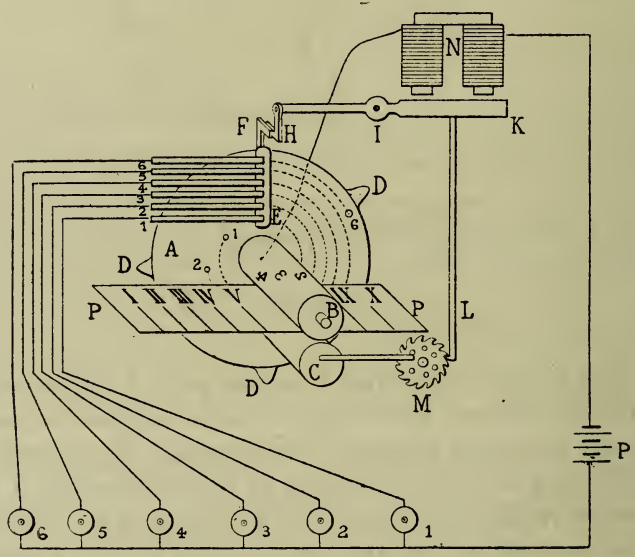


Fig. 557. — Contrôleur de rondes Napoli.

tation des chemins de fer. Une expérience prolongée peut seule renseigner sur les inconvénients qu'elle pourrait présenter.

681. Controleur de rondes. — Il est souvent intéressant d'avoir une preuve matérielle que les rondes de surveillance instituées dans un établissement ont été fidèlement exécutées et de savoir à quelles heures elles ont eu lieu : de nombreux appareils ont été imaginés pour avoir un contrôle effectif, et notamment dans plusieurs on a fait usage de l'électricité : nous indiquerons le principe du contrôleur de rondes de M. Napoli.

Les stations sont constituées par de simples boutons de sonnerie qui sont montés en dérivation sur un circuit comprenant une pile P

(fig. 557) et un électro-aimant N : les fils de ces boutons aboutissent à des ressorts qui viennent s'appuyer sur une barrette en fer E. Cette barrette est dirigée suivant l'un des rayons d'un disque isolant A dont l'axe métallique est relié à l'électro-aimant : elle se prolonge au delà du disque et son extrémité F vient buter contre un doigt H qui s'oppose à la rotation que tend à lui communiquer un rouage d'horlogerie; derrière ce disque se trouvent espacés d'angles égaux des rayons métalliques aboutissant à l'axe et terminés à leur extrémité opposée par un bouton qui traverse le disque et fait saillie sur la face antérieure. A la circonférence se trouve une dent rigide D en face de chaque rayon; ces rayons ont des longueurs différentes et telles que les boutons qui les terminent se trouvent respectivement en face de chacun des ressorts frotteurs.

Au disque est lié un cylindre B monté sur le même axe et portant en relief des lettres ou des numéros correspondant aux lettres ou aux numéros qui désignent chaque bouton; ces caractères sont distribués en hélice sur le cylindre de telle sorte que chaque caractère se trouve au point le plus bas quand le bouton correspondant sur le disque se trouve au point le plus haut, en contact avec le frotteur.

Sous le cylindre se meut une bande de papier PP qui se déroule uniformément sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie; elle porte des divisions et des indications d'heure. Elle passe sur un cylindre excentrique C qui, lorsqu'il n'est pas enclenché par une roue à rochet M fait un tour, presse le papier contre le cylindre et imprime le caractère situé au point le plus bas; la roue à rochet est commandée par un levier L lié à la palette de l'électro-aimant.

Au repos, la barrette est verticale en contact avec tous les frotteurs, quand on presse sur un des boutons le courant s'établit, l'électro-aimant attire la palette, l'extrémité de la barrette est dégagée, le disque commence à tourner, le courant cesse aussitôt; mais la rotation continuant, l'un des boutons du disque vient à passer sous le frotteur qui est relié au bouton sur lequel on presse, le courant s'établit de nouveau, la palette de l'électro-aimant est attirée, son levier bascule, le doigt qui le termine s'abaisse et vient buter contre une dent du disque qui est arrêté. A ce moment, le cylindre excentrique tourne et l'impression se fait indiquant par sa place sur le papier, l'heure à laquelle elle s'est produite.

Quand on cesse d'appuyer sur le bouton d'appel le courant cesse, la palette retombe, dégage le disque qui continue à tourner jusqu'à ce que son extrémité rencontre le prolongement de la barrette et

arrête le mouvement; tout est ramené à la situation primitive et disposé pour une nouvelle opération.

682. Casse-fils électriques. — Nous donnerons encore un exemple de l'emploi de l'électricité pour une application spéciale; c'est la disposition dite *casse-fil* à l'aide de laquelle on est averti lorsque dans un métier à bonneterie, par exemple, le fil vient à casser ou qu'il se présente des rugosités trop considérables : l'appareil peut même être installé de manière que, à ce moment, le métier cesse de fonctionner. Nous nous bornerons à indiquer le principe du casse-fil de M. Richard.

Le fil qui se déroule de la bobine A (fig. 558) passe sur divers guides B, D, E et poulies FG avant le point où il doit être utilisé entre les points D et E il supporte un cavalier constitué par un fil

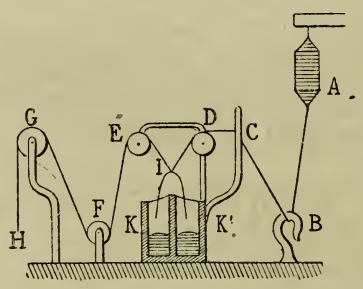


Fig. 558.

de platine courbé I; ce cavalier est ainsi suspendu au-dessus d'une auge en verre à deux compartiments K et K′ contenant du mercure. Ces compartiments correspondent l'un à la pile, l'autre à la sonnerie qui avertit ou, mieux, à l'appareil qui produit l'embrayage sous l'influence du courant. Tant que le métier marche régulièrement, le courant ne passe pas; mais si le fil casse, le cavalier de platine tombe, réunit les deux compartiments et le courant s'établit provoquant ainsi la sonnerie ou l'arrêt du métier par l'embrayage.

Le fil passe en C à travers une plaque métallique percée d'un trou assez fin; s'il présente une augmentation notable de diamètre, il casse et le résultat est le même que précédemment.

Nous passons sous silence divers détails qui sont sans utilité pour comprendre d'une manière générale le fonctionnement du système.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DES PROPRIÉTÉS DE L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE

683. Bluteur électrique. — Il est peu d'applications basées sur les propriétés de l'électricité statique; celles qui ont été proposées ne paraissent pas être entrées dans la pratique. Pour la plupart, elles utilisent l'étincelle électrique et, en général, il est plus commode d'employer les appareils d'induction qui ne sont pas aussi sensibles que les machines électriques aux influences atmosphériques : nous en signalerons cependant quelques-unes.

Il n'existe à notre connaissance qu'un appareil utilisant la propriété fondamentale des corps électrisés, celle d'attirer les corps légers; c'est un *bluteur électrique* construit en Amérique et qui a figuré à l'Exposition de 1881. Nous ignorons s'il est employé industriellement dans l'autre continent; il est curieux et mérite une description sommaire.

Le bluteur électrique a pour but d'obtenir la séparation du son et de la farine, en évitant le passage à travers le blutoir, tamis cylindrique animé d'un mouvement de rotation et soumis à de vives et nombreuses secousses. Ces secousses présentent l'inconvénient de disséminer dans l'atmosphère les parties les plus fines; d'où, perte d'une substance utile, production d'une atmosphère impure, probablement nuisible aux ouvriers et susceptible dans certains cas de produire des détonations par l'approche d'une flamme.

Le bluteur électrique inventé par MM. Thomas, B. Osborne et Kingsland Smith comprend un tamis horizontal animé d'un mouvement de va-et-vient sur lequel, à une extrémité, est amenée la farine brute; au-dessus de ce tamis sont disposés horizontalement des cylindres en caoutchouc durci (fig. 559) tournant autour de leurs

axes; ils frottent à la partie supérieure sur des peaux de mouton garnies de leur laine et s'électrisent ainsi superficiellement. En passant au-dessus de la farine brute les parties électrisées attirent le son sans agir sur la farine pure qui est tamisée comme à l'ordinaire. Le son entraîné par le cylindre en est détaché par les peaux de mouton et retombe dans de petites gouttières parallèles aux cylindres; à l'aide d'un frotteur mû par une corde sans fin, le son est progressivement amené à l'une des extrémités de la gouttière d'où il tombe dans un canal latéral où une vis d'Archimède l'entraîne dans un réservoir où il est recueilli.

Dans l'appareil exposé en 1881, il y avait 24 cylindres montés 3 par 3 sur 8 axes; chacun d'eux avait un diamètre de $0^m,15$ et une longueur de $0^m,25$ environ; ils faisaient 30 à 35 tours par minute.

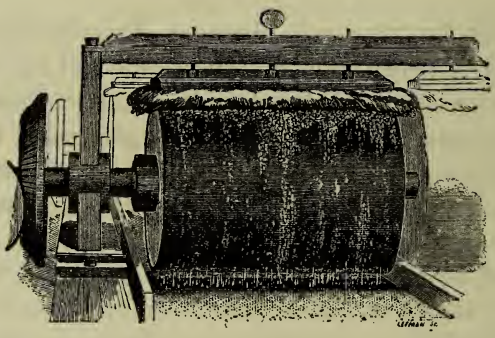


Fig. 559. — Bluteur électrique (*La Lumière électrique.*)

La surface occupée ne dépassait pas 2 mètres carrés; l'appareil exigeait une force de 1/2 cheval vapeur et était susceptible, paraît-il, de bluter 200 à 300 kilogrammes de farine par heure suivant la nature des grains employés.

684. Condensation des fumées et poussières par l'étincelle électrique. — M. Lodge, au congrès de la *British Association*, à Montréal, en 1884, a montré que des poussières mises en suspension dans l'atmosphère se déposent rapidement sous l'influence de décharges électriques. M. Walker (de Londres) pensa à appliquer cette curieuse propriété à la condensation des fumées du plomb volatil des fourneaux; cette condensation ne se fait dans les conditions ordinaires que très lentement et très imparfaitement; dans des expériences faites sur les fumées mêmes qui traversaient la cheminée et que l'on recueillait dans un récipient muni d'ouvertures

fermées par des lames de verre, on étudia l'effet des étincelles électriques; ces étincelles, fournies par une machine de Voss, atteignaient 0m,10 de longueur.

Les fumées étant au repos, lorsque la machine fonctionnait, on les voyait tourner rapidement, puis former de larges flocons et enfin se déposer. Un effet analogue fut observé lorsque l'on opéra sur le courant de fumées émanant directement des fourneaux; il ne se manifestait pas au point où agissaient les étincelles à cause de la rapidité du courant, mais il était très net à l'orifice de sortie.

Si dans les applications pratiques qui doivent être faites les résultats sont aussi avantageux que dans les expériences préliminaires que nous venons de citer, il est certain que ce procédé se répandra et sera appliqué à d'autres industries présentant des conditions analogues. Mais il nous paraît probable que l'on emploiera alors, non des machines électriques, mais des appareils d'induction pour fournir les étincelles qui sont nécessaires.

685. Allumoir électrique. — L'étincelle électrique est susceptible d'enflammer un jet de gaz d'éclairage; cette propriété a été utilisée par M. Clarke pour construire un appareil destiné à remplacer les allumoirs à flamme d'huile ou d'alcool qui sont susceptibles de produire des accidents, d'enflammer accidentellement des corps combustibles.

L'allumoir électrique (fig. 560), comprend une poignée et un manche : la poignée est formée par un cylindre creux en ébonite; à l'intérieur se trouve une partie mobile constituant avec le cylindre une véritable machine électrique analogue au *replenisher* de sir William Thomson (313). On obtient le mouvement de rotation en pressant sur un bouton *c* qui, à l'intérieur, porte une crémaillère engrenant avec une roue dentée; lorsque l'on cesse de presser, un ressort à boudin ramène le bouton à sa position primitive. Par ce mouvement de rotation on amène deux conducteurs métalliques à des états électriques opposés.

Le manche est constitué par un cylindre en ébonite E de telle longueur qu'il est jugé nécessaire et présentant une partie ouverte à son extrémité libre ; deux tiges métalliques isolées l'une de l'autre traversent ce cylindre, elles communiquent à une extrémité chacune avec l'un des conducteurs électriques que nous avons signalés au-dessus. Les extrémités opposées h, h_1 aboutissent à la cavité creusée dans le manche où elles sont séparées par un intervalle que l'on a réglé à l'avance.

Lorsque l'on presse sur le bouton et que la machine fonctionne,

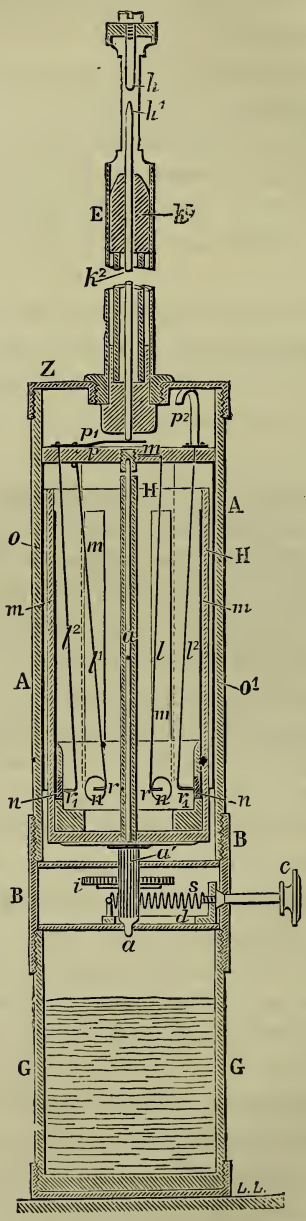


Fig. 560. — Allumoir électrique. (*La Lumière électrique.*)

des étincelles éclatent entre ces extrémités ; si on les produit auprès de l'orifice d'un brûleur à gaz, le gaz s'enflamme.

Toute action cessant lorsque l'on n'agit pas sur le bouton, il ne peut y avoir d'inflammation accidentelle.

Il est convenable pour le bon fonctionnement de l'appareil que la poignée contienne une substance hygrométrique qui maintienne sec l'air qui entoure la machine électrique ; sans cette précaution, celle-ci ne pourrait fonctionner.

686. Allumage des becs de gaz par l'étincelle électrique. — Le problème de l'allumage de becs de gaz se présente quelquefois dans des conditions un peu différentes. On peut, par exemple, se proposer d'allumer rapidement tous les becs de gaz d'une salle : le problème a été résolu à la salle de l'Assemblée nationale à Versailles en 1873 et à la salle du Sénat en 1880 par M. Gaiffe.

Prenons pour exemple la salle de Versailles : les 356 becs qu'elle comprenait étaient munis chacun d'un *inflammateur* constitué par deux tiges de fer entre lesquelles éclataient les étincelles lorsque l'appareil entrait en action. Ils étaient répartis en 18 groupes reliés séparément par des cables isolés dont la longueur totale atteignait 1400 mètres à une bobine d'induction capable de donner des étincelles de $0^m,15$ lorsqu'elle était actionnée par une pile formée par 4 grands couples au bioxyde de manganèse. Un distributeur permettait d'envoyer le courant successivement dans chacun des 18 groupes; l'allumage de tous les becs de chaque groupe se produisait simultanément; le mouvement du distributeur consistait dans la rotation d'une manette et s'effectuait rapidement. L'allumage des 356 becs demandait seulement 14 secondes.

D'autres dispositions ont été adoptées, mais elles ne présentent pas de différences essentielles et il est inutile de nous y arrêter.

687. Inflammation des corps explosifs par l'étincelle électrique. — Les étincelles électriques que l'on peut provoquer à une distance quelconque, en un point déterminé à l'avance d'un circuit métallique, ont été utilisées, pour la chaleur qu'elles produisent, à amener l'explosion de corps détonants, de fourneaux de mines par exemple. Ce procédé présente sur l'emploi des mèches de nombreux avantages qu'il nous suffit de signaler rapidement; il assure en effet l'explosion au moment précis où elle doit se produire, ce qui, en temps de guerre, peut être d'une utilité incontestable ; pour les travaux de terrassement ou autres, cette précision permet d'éviter absolument les accidents. De plus, lorsqu'il y a plusieurs mines placées à peu de distance, la simultanéité *absolue* d'action produit des effets très puissants que l'on obtient pas si les explosions se font seulement *à peu près* au même instant.

L'inflammation des mines par l'électricité se produit par l'intermédiaire d'amorces que l'on place en contact avec les corps détonants; ces amorces peuvent être enflammées soit par l'action d'étincelles électriques, soit par l'action de courants continus; les premières sont dites *amorces de tension*, les autres *amorces de quantité;* nous avons déjà parlé des dernières, occupons-nous maintenant des premières.

Il semblerait qu'il suffit d'amener au milieu de la poudre les extrémités de deux conducteurs entre lesquels on ferait éclater une étincelle électrique pour provoquer l'explosion : il n'en est rien et, dans ces conditions, la poudre ne s'enflamme pas, il semble que l'action est de trop faible durée et pour assurer l'inflammation il faut interposer entre les deux extrémités du fil conducteur une substance

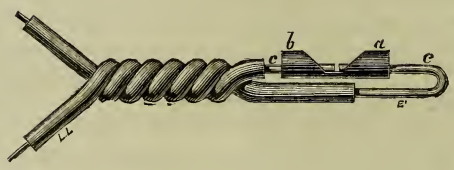


Fig. 561. — Amorce Stateham.

Fig. 562. — Amorce de tension. (*La Lumière électrique.*)

constituant un conducteur présentant une résistance suffisante pour s'échauffer suffisamment. Le fait paraît avoir été observé pour la première fois par Stateham sur un fragment de cable sous-marin (fig. 561) dont on avait entaillé largement l'enveloppe en gutta-percha et dont on avait coupé le fil sur une petite étendue : c'était le sulfure de cuivre qui s'était déposé sur la gutta-percha qui servait au courant de conducteur médiocre ; un fragment de ce genre mis en contact avec de la poudre en produisit l'inflammation. Toutes les autres amorces de tension (fig. 562), présentent la même disposition générale et, en plus de détails de construction sans intérêt au point de vue électrique, ne diffèrent que par la nature de la substance interposée entre les extrémités du conducteur qui sont fixées dans une enveloppe cylindrique. Le nombre des modèles différents est très grand, nous n'avons pas à nous y arrêter.

688. — Les amorces de tension ont quelques avantages, elle sont

peu susceptibles, de confection simple; elles peuvent fonctionner sous l'influencé de producteurs d'électricité robustes; elles assurent la simultanéite *absolue* de toutes les amorces qui sont situées sur le

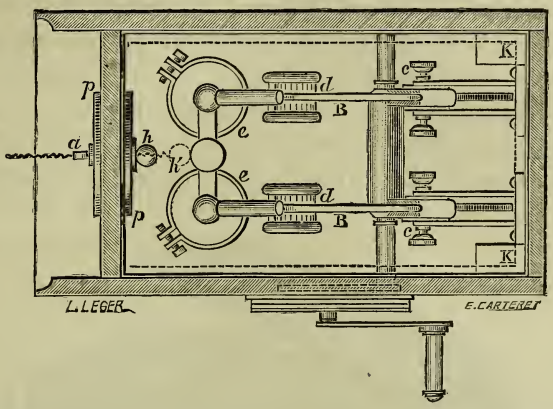


Fig. 563. — Machine électrique à condensateur pour l'explosion des mines. (*La Lumière électrique.*)

même circuit. Mais elles présentent également quelques désavantages elles exigent un isolement aussi parfait que possible et, surtout,

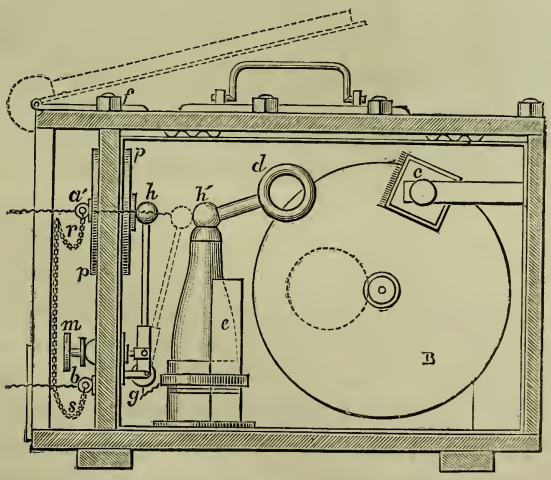


Fig. 564.

elles ne se prêtent à aucune vérification permettant de s'assurer que le circuit est dans des conditions satisfaisantes.

Les amorces de tension peuvent fonctionner sous l'influence de

charges fournies par des machines à électricité statique; on a construit des modèles spécialement pour cet usage (fig. 563 à 565) et comprenant des condensateurs *e* que l'on chargeait par l'action d'une ou de deux machines à plateau B et dont la décharge provoquait l'explosion. Mais ces appareils ne semblent pas devoir être conservés et il y a avantage à les remplacer par des machines d'induction donnant également des étincelles et présentant plus de solidité; nous allons décrire quelques modèles spéciaux.

689. Des exploseurs. — Les étincelles fournies par des appareils d'induction peuvent être utilisées dans les mêmes conditions que

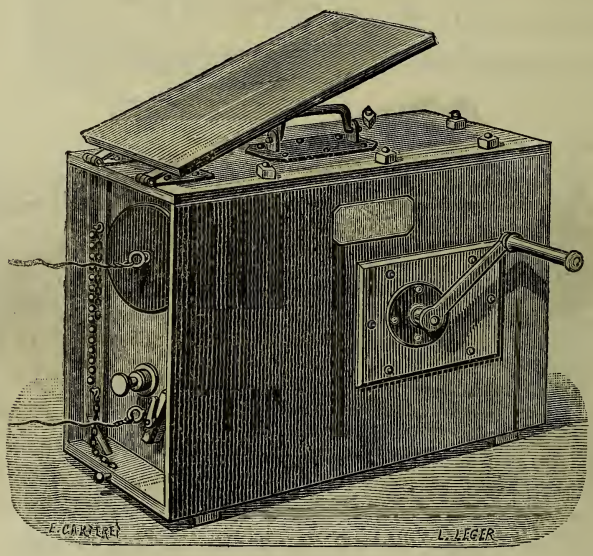


Fig. 565.

celles que fournissent les machines à électricité statique; nous n'avons donc rien à ajouter à ce que nous avons dit sur le mode d'emploi des amorces dites de tension et sur l'avantage que l'on peut retirer de l'électricité pour provoquer l'explosion de corps détonants, l'inflammation des mines, etc.

Tous les appareils d'induction d'une puissance suffisante peuvent être utilisés pour provoquer l'inflammation des amorces de tension : on fait usage généralement d'appareils magnéto-électriques désignés sous le nom d'*exploseurs*. L'un des premiers modèles construits dans ce but est connu sous le nom de *coup de poing Bréguet* (fig. 566) : il se compose d'un électro-aimant en fer à cheval formé de lames d'acier

superposées; sur les régions polaires sont installées des bobines dont les fils sont réunis de manière à ce que les effets s'ajoutent : les autres extrémités sont reliées au circuit qui comprend l'amorce ou les amorces. Une armature de fer doux est appliquée entre les pôles de l'aimant pouvant tourner autour d'une charnière parallèle à la ligne des pôles : le mouvement lui est communiqué par une pièce métallique terminé par un bouton et constituant avec elle un levier coudé. Lorsque l'on écarte l'armature de fer doux, il se produit une variation de l'état magnétique et un courant prend naissance, courant correspondant à une force électro-motrice d'autant plus forte que le mouvement est de moindre durée, qu'il est plus brusque, ce que l'on obtient en frappant fortement avec le poing

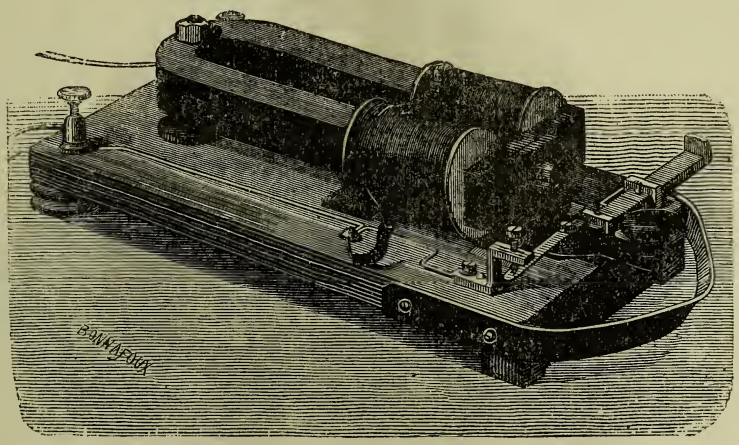


Fig. 536. — Exploseur, coup de poing. (*Bréguet.*)

sur le bouton. Un ressort est porté sur le bras du levier coudé et vient toucher une vis de butée, établissant une communication métallique entre les bornes où aboutissent les fils du circuit extérieur; tant que le contact est maintenu les électro-aimants sont fermés sur eux-mêmes et presque rien ne parvient dans le circuit extérieur qui n'est parcouru par la totalité du courant que lorsque le ressort cesse de toucher la vis, rompant ainsi le court circuit; cette rupture se produit vers la fin du mouvement et l'appareil est disposé pour que, à cet instant, l'extra-courant vienne ajouter son effet à celui du courant induit.

Enfin un verrou métallique immobilise l'armature lorsque l'appareil ne doit pas fonctionner afin d'éviter les accidents.

Dans un modèle d'exploseur (fig. 567), M. Marcel Deprez dispose une bobine B sur une pièce de fer doux placée entre les branches. d'un aimant en U et mobile autour d'un axe parallèle à ces branches Lorsque, à l'aide de la manette F, on porte brusquement les pièces

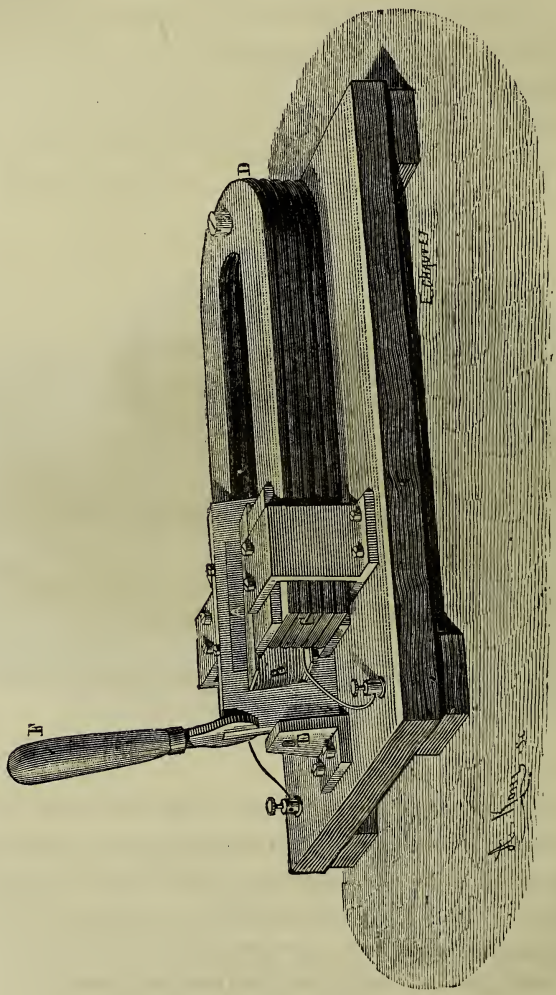


Fig. 567. — Exploseur Marcel Deprez. (*La Lumière électrique.*)

mobiles d'un pôle à l'autre, un courant induit prend naissance dans le circuit dont fait partie la bobine.

M. Marcel Deprez a également combiné un exploseur (fig. 568) qui comprend un aimant en fer à cheval A et une armature de fer

doux B qui peut s'appliquer exactement contre les pôles et que l'on en peut écarter par l'action d'un levier coudé E sur lequel on donne un coup de poing; mais c'est cette armature qui porte la bobine C dont le fil est gros et court. Le courant qui s'y produit par suite du mouvement n'est d'ailleurs pas utilisé directement, mais il est dirigé dans le fil inducteur d'une bobine de Ruhmkorff munie de l'interrupteur de Marcel Deprez (351). Dans ces conditions on observe des étincelles chaudes et susceptibles de provoquer l'inflammation des corps combustibles.

690. Électricité atmosphérique et terrestre. — L'atmosphère est le siège de phénomènes électriques qui se manifestent de diverses façons : tantôt d'une manière brusque en produisant des effets considérables, comme il arrive par les temps orageux, et tantôt d'une façon à peine sensible et telle qu'il faut employer des appa-

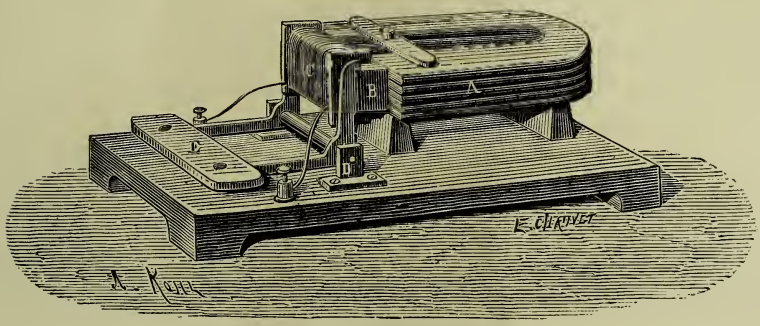


Fig. 568. — Exploseur Marcel Deprez. (*La Lumière électrique*).

reils délicats pour mettre ces phénomènes en évidence. Nous nous occuperons d'abord de ces derniers.

Les diverses couches de l'atmosphère ne sont pas dans le même état électrique, elles ne sont pas au même potentiel : les observations montrent qu'elles sont d'autant plus électrisées positivement qu'on s'élève davantage; par convention les couches qui sont au contact de la terre sont supposées au potentiel *zéro*.

Ce n'est en somme que la différence de potentiel entre les diverses couches atmosphériques ou entre celles-ci et le sol que nous pouvons observer ; nous n'avons aucun moyen de reconnaître l'état absolu d'une couche déterminée au point de vue électrique ; un électroscope quelque sensible qu'il soit ne fournit aucune indication lorsqu'il est placé dans une couche d'air quel que soit le degré d'électrisation de celle-ci. C'est un fait d'observation qu'il est d'ail-

leurs facile d'expliquer par l'hypothèse que nous avons admise sur le rôle électrique du milieu ambiant.

690. — Pour observer des effets électriques à l'aide d'un électroscope à feuilles d'or il faut mettre les feuilles d'or en équilibre électrique avec une couche située à un autre niveau que celui où elles se trouvent, il faut les amener au même potentiel. C'est à quoi l'on arrive par exemple en enlevant le bouton qui surmonte l'appareil et le remplaçant par une longue tige verticale terminée en pointe (fig. 569) : la partie supérieure de celle-ci, à cause de sa pointe, prend le potentiel de l'air environnant et à cause du conducteur métallique, les feuilles d'or prennent le même potentiel; si, comme il arrive ordinairement, il n'a pas la même valeur que celui

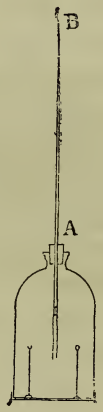


Fig. 569. — Électroscope de Saussure.

de la couche dans laquelle se trouvent les feuilles d'or, celles-ci divergent : on peut, suivant la méthode ordinaire, reconnaître la nature de l'électrisation en approchant de l'appareil, que l'on désigne sous le nom d'électroscope de Saussure, un bâton de verre ou un bâton de résine électrisé par frottement.

Lorsque l'on fait des observations dans une station météorologique fixe on peut remplacer l'électroscope par un électromètre de Thomson qui permet d'évaluer la différence de potentiel et non pas seulement de la mettre en évidence. Dans ce cas on peut avoir un conducteur métallique vertical d'une grande longueur ; pour que, à la partie supérieure, l'équilibre électrique s'établisse promptement, on a proposé de remplacer la pointe par une baguette de papier roulé imprégné d'azotate de plomb ; lorsqu'on l'enflamme,

le papier brûle en s'effilant en pointe et les gaz qui résultent de la combustion en se dégageant amènent rapidement l'égalité de potentiel comme cela avait été indiqué par Volta. L'appareil devient beaucoup plus sensible que par l'action de la pointe; à vrai dire, il peut subsister quelques doutes et l'on peut se demander si la combustion même n'est pas une source d'électrisation. On peut plus sûrement employer le procédé indiqué par sir William Thomson qui établit la communication de l'appareil avec un vase métallique isolé contenant de l'eau qui s'écoule goutte à goutte par un tube métallique de petit diamètre; l'égalisation de potentiel entre le vase et la couche d'air est promptement obtenue par ce procédé.

691. — M. Mascart a combiné une disposition dans laquelle il a réuni cet appareil à écoulement et son électromètre (277) de manière à obtenir l'enregistrement photographique des indications de l'électromètre. L'eau s'écoule d'un vase en laiton de grandes dimensions placé sur des supports isolants par un tube métallique de $1^m,50$ à 2 mètres de longueur. Le vase est relié à l'électromètre par un fil métallique soutenu par des supports isolants.

L'électromètre est placé dans une chambre obscure; on dirige sur le miroir un faisceau lumineux de direction constante; le faisceau réfléchi vient frapper une plaque photographique se mouvant verticalement, c'est-à-dire dans une direction perpendiculaire au plan dans lequel se déplace le faisceau réfléchi.

Le faisceau lumineux peut être produit par une petite lampe au gazogène qui possède un pouvoir photogénique suffisant et qui dépense peu; la lampe est placée dans une lanterne fermée et la lumière reçue par une lentille est dirigée à travers une fente verticale et projetée sur le miroir de l'électromètre qui la renvoie sur une plaque sensible placée dans une caisse présentant, à cette hauteur une fente horizontale. La plaque sensible reçoit son mouvement vertical descendant d'une horloge à pendule et à poids.

La ligne de repère est donnée par la lumière qui est réfléchie sur la face plane de la lentille fixée à l'électromètre l'intensité du faisceau est plus faible, mais donne une trace suffisante; l'orientation de la lentille doit être telle que sa face plane soit parallèle à la direction du miroir lorsque l'aiguille est mise en communication avec le sol.

Enfin la plaque sensible est placée dans un châssis entre une lame de verre noir et une lame de verre blanc sur laquelle on a gravé des traits équidistants tels que leur distance mesure le dépla-

cement du châssis pendant une heure; il y a en outre des chiffres permettant le repérage.

692. — Il faut employer des dispositions particulières lorsqu'il s'agit d'observations à faire dans des voyages, des explorations. L'électroscope porte alors une courte tige à la partie supérieure; on a d'autre part un conducteur métallique souple terminé à une extrémité par un anneau que l'on enfile sur la tige de l'appareil et à l'autre par une flèche. On lance cette flèche qui, terminée en pointe, se met successivement au même potentiel, ou à peu près au moins, que les couches qu'elle traverse; arrivée à une certaine hauteur l'anneau est entraîné, glisse sur la tige métallique et quitte l'électroscope qui reste chargé comme il était à l'instant où le contact a cessé, c'est-à-dire comme la couche dans laquelle était la flèche à cet instant. Il a fallu s'assurer, pour pouvoir compter que les résultats de ces observations sont exacts, que le frottement de la flèche contre l'air n'est pas susceptible de charger l'électroscope. On fait aisément cette vérification en recommençant la même expérience, mais lançant la flèche horizontalement, c'est-à-dire dans une couche qui est au même potentiel que l'électroscope et reconnaissant que les feuilles d'or ne divergent pas.

693. — Ainsi que nous l'avons dit d'une manière générale, le potentiel des diverses couches s'accroît à mesure que l'on s'élève; si l'on cherche à déterminer la forme d'une couche qui est à un potentiel déterminé, on reconnaît qu'elle est horizontale si le terrain au-dessus de laquelle elle se trouve est plan ; mais s'il est accidenté, s'il présente des parties saillantes, des constructions qui s'élèvent au-dessus du plan horizontal, cette couche se relève également au-dessus de cette partie, suivant ainsi la forme de la surface matérielle, ces surélévations sont d'autant moindres que la couche considérée est à une plus grande altitude, si bien que, à partir d'une certaine hauteur, elles s'effacent de plus en plus et que les couches d'égal potentiel tendent à devenir des plans horizontaux.

En faisant des observations en un même point, on trouve que l'état électrique change d'un instant à l'autre, présentant en général deux maxima et deux minima chaque jour et que, de plus, la valeur moyenne de la journée (qui correspond à peu près à celle que l'on observe à 11 heures du matin) varie d'un jour à l'autre.

Toutes les circonstances atmosphériques influent d'ailleurs et modifient d'une manière très notable les conditions électriques.

Quelques chiffres donneront une idée approximative de la grandeur des phénomènes et de ses variations. Sir William Thomson a

trouvé que pour deux points distants verticalement de 1 pied, la différence de potentiel atteignait, à l'île d'Arran, la valeur de 23 volts. D'autre part l'électricité en janvier, à Bruxelles, a été trouvée treize fois plus considérable qu'en juin.

694. — Quelle est l'origine de cette électricité? Existe-t-elle naturellement dans l'atmosphère, sa répartition changeant seulement sous des influences qui n'ont pas été définies nettement jusqu'à présent? ou bien est-elle la conséquence d'actions diverses qui, à chaque instant provoquent une rupture électrique et amènent ainsi une différence de potentiel entre la terre et l'atmosphère? Pour expliquer qu'il en puisse être ainsi, on a invoqué comme cause, les combustions vives ou lentes qui se font à la surface du sol, la respiration des animaux, l'évaporation des liquides, etc. Toutes ces causes peuvent avoir une certaine influence; il semble douteux qu'elles donnent une explication complète et il est préférable d'avouer que l'on ne connaît pas l'origine réelle de l'électrisation de l'atmosphère.

Les effets de cette électrisation ne sont pas mieux connus, d'une manière générale, que ses causes. Laissant de côté les phénomènes qui se produisent dans les temps d'orage et dont nous parlons un peu plus loin, nous ne pouvons guère rien citer de certain. Il résulterait cependant d'intéressantes recherches et d'expériences faites dans les régions polaires par M. Lemström que, comme on le soupçonnait, les *auroles boréales* ou *aurores polaires* sont des conséquences de l'électrisation du sol et de l'atmosphère.

Il paraît vraisemblable que l'état électrique de l'atmosphère agit sur les êtres vivants; chez certains sujets nerveux les approches de l'orage s'accompagnent de sensations, mal déterminées d'ailleurs, dont on ne connaît pas la cause, mais qu'il semble d'autant plus naturel de rattacher à l'état électrique que souvent ces sensations disparaissent ou s'atténuent considérablement au premier coup de tonnerre qui ramène l'équilibre électrique au moins pour un temps. Il n'est pas douteux que lorsque l'air est fortement chargé d'électricité, c'est-à-dire lorsque la différence de potentiel entre deux couches voisines est considérable, le corps ne doive être le siège de phénomènes électriques, de manifestations électriques diverses. Le fait a été observé et on connaît les récits classiques des étincelles que lançaient les piques des soldats de Bélisaire et les feux qui surmontaient les javelots des légionnaires de César. On a même cité des cas dans lesquels en élevant les mains pendant la nuit on voyait des aigrettes lumineuses qui se produisaient au bout des doigts. Il

n'a pas été constaté que, dans ces conditions assez spéciales pourtant et qui dénotent une électrisation intense, il ait été observé de sensations spéciales, d'effets particuliers.

Si l'on n'a pas de renseignements précis sur l'action de l'électricité atmosphérique normale sur l'homme et les animaux, on a pu faire des expériences sur les végétaux. Une plante placée au centre d'une cage métallique en treillage métallique à très larges mailles peut être considérée à tous égards comme dans les conditions ordinaires d'air, de chaleur, de lumière, d'humidité, mais elle doit être au potentiel *zéro*, n'étant influencée en rien par les phénomènes électriques qui se produisent dans l'atmosphère au dehors de la cage. On a fait pousser comparativement des plantes ainsi protégées contre l'électricité et des plantes de même espèce à l'air libre entièrement; malheureusement les résultats n'ont pas été tous concordants et, tandis que MM. Grandeau, Leclerc et Celi ont trouvé que les plantes sous cage étaient moins vigoureuses que celles à l'air libre, M. Naudin arrivait à un résultat inverse : il est vrai que les recherches n'avaient pas porté sur les mêmes plantes et que les conditions climatologiques n'avaient pas été les mêmes. Mais lorsque l'on songe à l'influence que l'électricité exerce sur les combinaisons de l'azote, même lorsque cet agent agit à très faibles doses, comme l'a montré M. Berthelot (397), on ne peut s'empêcher de croire que l'électricité atmosphérique doit jouer un rôle réel dans les phénomènes chimiques de la végétation. Nous pensons qu'elle n'est pas sans action sur les animaux.

695. Électricité des nuages orageux. — Indépendamment des traces d'électricité que l'on peut recueillir à diverses hauteurs, même dans une atmosphère calme, il est possible d'observer des phénomènes beaucoup plus intenses par les temps orageux; les variations du potentiel peuvent être beaucoup plus rapides et, de plus, les nuages peuvent présenter une électrisation très marquée.

Cette électrisation a été mise en évidence par l'expérience classique de Franklin, par les recherches de Dalibard, de Romas et de Richer; dans toutes ces expériences, en somme, un conducteur terminé en pointe est élevé à une certaine hauteur ; la partie inférieure qui est isolée se met en équilibre avec la partie supérieure qui, elle-même, est en équilibre avec la couche où elle se trouve : il y a donc à la base une différence notable de potentiel avec les couches voisines du sol, d'où résultent des effets qui peuvent être considérables. Aussi ces expériences sont-elles dangereuses et ont-elles amené des accidents. Elles sont abandonnées mainte-

nant. Mais les effets des variations électriques de l'atmosphère se font sentir dans les lignes télégraphiques étendues dans lesquelles, sous cette influence, naissent des courants qui peuvent être assez énergiques.

696. — On a recherché l'origine de l'électricité des nuages et l'on a invoqué diverses causes : il serait possible que, sans avoir recours à aucune hypothèse particulière, il fût possible d'expliquer cette électrisation, qui peut être très accentuée, simplement par l'électrisation même des couches d'air.

La condensation de la vapeur à l'état vésiculaire, qui paraît constituer les nuages, en diminuant l'étendue sur laquelle est répartie une quantité donnée d'électricité doit élever le potentiel, la capacité devenant moindre. Mais en outre, M. Pellat a fait ressortir qne la variation de potentiel des diverses couches suffirait pour expliquer qu'un nuage, par l'ascension d'un niveau à un autre, pût atteindre un potentiel bien supérieur à celui d'un nuage qui serait resté immobile. Cette différence pourrait être environ de 600 unités (électrostatiques) pour deux nuages dont l'un serait à une altitude de 1200 mètres, l'autre à une altitude de 600 mètres. D'après les recherches de M. Mascart, on doit considérer que cette différence de potentiel suffit pour expliquer les effets et notamment les étincelles électriques qui peuvent jaillir entre ces nuages.

697. Éclairs et tonnerre. — Lorsqu'un nuage fortement électrisé, comme il s'en trouve dans les temps orageux, se trouve à une certaine distance du sol, il agit par influence sur les corps qui sont à la surface du sol et aussi sur les couches superficielles, notamment sur les couches aquifères qui sont conductrices ; si l'action électrique augmente soit par suite d'un rapprochement du nuage, soit par suite d'une électrisation plus forte qu'il acquiert par une cause quelconque, l'équilibre électrique se rétablit par une ou plusieurs étincelles éclatant à travers l'air et suivant, non pas le chemin géométriquement le plus court, mais vraisemblablement le moins résistant au passage de l'électricité ; on dit alors que la *foudre tombe*. L'éclair, c'est l'étincelle même et le tonnerre est le bruit qui l'accompagne. Les corps qui sont sur le passage de l'électricité peuvent subir des actions très énergiques, on dit qu'ils sont *foudroyés*.

Des effets analogues peuvent se produire entre deux nuages voisins dont l'un au moins est électrisé ; quoique, alors, la foudre ne tombe pas, il peut en résulter des effets spéciaux pour les corps qui sont dans le champ d'action de ces nuages.

Les éclairs sont constitués par un trait lumineux présentant une

forme en zigzag caractéristique ; leur longueur peut être considérable, dans certains cas, elle a été évaluée à plus de 10 kilomètres. Ils sont de très courte durée : Wheatstone examinant un disque tournant rapidement à la lueur d'un éclair ne put observer aucun déplacement apparent des figures qui y étaient tracées, il en conclut que la durée était inférieure à $0^s,001$.

Cette courte durée, jointe à l'éclat très vif de l'étincelle et à sa production inopinée, fait qu'il est difficile de l'observer aisément. On l'a étudiée cependant, et maintenant l'étude devient relativement facile depuis que les progrès de la photographie rapide ont permis d'obtenir l'image photographique des éclairs. On a reconnu que, comme il arrive pour les autres étincelles, l'éclair est souvent formé de plusieurs traits lumineux présentant quelquefois un certain parallélisme et quelquefois se ramifiant pour aboutir à des points différents.

Nous parlerons plus loin du phénomène connu sous le nom d'*éclair en boule.*

698. — Le tonnerre est un bruit fort qui accompagne l'éclair. Quelquefois il est bref, le plus souvent il est prolongé et présente des renforcements caractéristiques. Le bruit est sec, bref lorsque l'éclair est relativement court et que ses divers points sont à peu près à la même distance de notre oreille ; s'il en est autrement, à cause de la vitesse relativement faible du son, l'impression dure un certain temps ; le bruit est bien produit simultanément, ou à peu près, en tous les points de l'éclair, mais il parvient avec un retard d'autant plus grand que les points d'où il émane appartiennent à une partie plus éloignée de l'éclair ; il est possible en outre que la production de l'écho sur les nuages contribue à allonger la durée du tonnerre.

C'est aux échos qui peuvent aussi prendre naissance qu'on attribue en général les augmentations de bruit, les grondements si caractéristiques du tonnerre ; cette cause doit intervenir dans une certaine mesure ; elle peut n'être pas la seule et l'on peut invoquer également la forme sinueuse, brisée, de l'éclair qui change la loi suivant laquelle le son nous parvient : pour certaines parties, le son émané de divers points arrive successivement, pour une autre direction de l'éclair, le son arrive simultanément de tous les points.

Les effets de la foudre sur les corps qui sont foudroyés sont analogues à ceux que produisent les étincelles des machines ou des batteries, ils sont seulement plus puissants. La foudre produit la combinaison des corps, comme il est prouvé par l'acide azotique que

l'on a observé dans des pluies d'orage; elle produit la formation d'ozone, l'inflammation des corps combustibles, allume des incendies; elle amène l'incandescesce des conducteurs métalliques qu'elle traverse, leur fusion, leur volatilisation même; elle brise, fait éclater les corps qui présentent une conductibilité insuffisante; elle fond des matières, presque réfractaires comme le sable; elle transporte à distance des masses d'un grand poids; elle produit l'aimantation de barreaux d'acier et affole les aiguilles aimantées.

Enfin la foudre agit sur les êtres vivants; quelquefois elle les atteint sans produire aucune action spéciale autre qu'un éblouissement passager; mais quelquefois elle provoque des désordres graves, la paralysie de tout ou partie du corps et souvent la mort même. Ces actions peuvent être accompagnées de lésions matérielles apparentes qui peuvent cependant ne pas exister, même dans les cas de mort ; on peut admettre que, dans ces cas, il y a eu action sur le système nerveux, sur le cerveau, sur le bulbe, c'est au moins ce qui semble résulter d'autopsies faites sur des individus foudroyés ou tués accidentellement par de puissantes décharges et sur des animaux que l'on soumettait à des actions électriques énergiques émanant de machines d'induction.

699. Éclairs en boule. — A côté de la foudre et de l'éclair que l'on observe assez souvent, il y a lieu de signaler un phénomène plus rare et dont l'existence même a été niée, quoique des observations très nettes le décrivent : nous voulons parler du tonnerre en boule, de l'éclair globulaire. On désigne sous ce nom un globe lumineux dont les dimensions ont été variables suivant les cas, mais dont le diamètre n'a que rarement été évalué supérieur à 1 mètre (il est vrai que comme souvent on ignorait la distance, on a dû se borner à des comparaisons basées sur la grandeur du diamètre apparent, comparaisons qui ne peuvent rien apprendre de précis). Ce globe, dont on ne signale pas le point de départ, se déplace lentement pendant un temps qui, dit-on, a dépassé 5 à 6 minutes, ne produit aucun effet sur son passage, jusqu'à ce que, soudainement, sans cause apparente, en général, il éclate, produisant des ravages analogues à ceux de la foudre même.

Pendant longtemps, faute de pouvoir expliquer ce phénomène, on n'était pas éloigné de le nier et d'admettre que les observateurs avaient été trompés par des apparences; mais, outre qu'il existe des relations très précises, émanées d'observateurs instruits, M. Planté a pu reproduire un phénomène analogue : il prend deux disques de papier à filtrer, humectés d'eau distillée et séparés par

une couche d'air et mis en rapport avec les pôles d'une pile secondaire de 800 couples : on voit apparaître une véritable boule de feu qui court de côté et d'autre entre les deux surfaces, présentant ainsi une grande ressemblance avec le tonnerre en boule. On ne sait d'ailleurs, au juste, en quoi consiste ce phénomène qui exige pour se produire à la fois une grande tension et un puissant débit d'électricité.

700. Choc en retour. — Ce n'est pas seulement au point où tombe la foudre que les êtres vivants peuvent être impressionnés, mais à une distance quelquefois assez grande; des effets analogues peuvent aussi se produire à la suite de décharges entre les nuages et sans que la foudre tombe à proprement parler : c'est là ce qui constitue le *choc en retour*. L'explication en est facile.

Considérons un nuage électrisé agissant par influence sur les objets placés sur le sol et les amenant à un état électrique contraire au sien; si le nuage se décharge lentement, ces objets reviendront progressivement à l'état neutre et aucun effet ne se manifestera. Mais si le nuage est brusquement ramené à l'état neutre par une décharge avec un autre nuage, par exemple, l'influence cessera brusquement et brusquement, s'ils sont en contact avec le réservoir commun, avec le sol conducteur, ces objets seront aussi ramenés à l'état neutre : ils seront donc le siège d'un mouvement brusque de l'électricité. Il ne semble pas que cette action soit suffisante pour produire des effets appréciables sur les corps inorganisés, mais ils suffisent pour agir sur les êtres vivants, produire des secousses et même amener la mort d'animaux et d'hommes qui s'y sont trouvés exposés.

701. Paratonnerres. — Pour éviter les effets fâcheux qui peuvent résulter de l'électricité des nuages orageux, il suffit d'éviter le rétablissement brusque de l'équilibre électrique, il suffit d'éviter que les corps que l'on veut protéger soient soumis à l'action de l'étincelle. Franklin, se basant sur le pouvoir des pointes, parvint à réaliser en 1752 les conditions qui permettent d'atteindre ce résultat.

Si, au-dessous d'un nuage orageux, on vient à placer un conducteur métallique terminé en pointe à sa partie supérieure et aboutissant à sa partie inférieure dans des couches aquifères, constituant vraiment le réservoir commun, l'influence se produira et, peu à peu, comme nous l'avons expliqué pour l'expérience classique (74), le nuage sera déchargé soit par l'action directe de la pointe, soit par l'action des molécules d'air électrisées qui, repoussées par la pointe,

viennent le neutraliser. On aura ainsi agi préventivement, on aura empêché la foudre de se produire : ce conducteur métallique que nous venons de décrire, c'est le *paratonnerre*. Il est clair qu'il doit, pour être le plus efficace possible, être placé au-dessus des objets qu'il doit protéger. On n'est pas d'accord d'ailleurs sur la zone que protège un paratonnerre déterminé : on admet approximativement qu'il garantit l'espace compris dans un cône dont il serait l'axe, la pointe du paratonnerre étant le sommet, et dont la base serait égale à 1 fois 1/2 la hauteur.

702. — Les paratonnerres sont généralement placés sur les toits

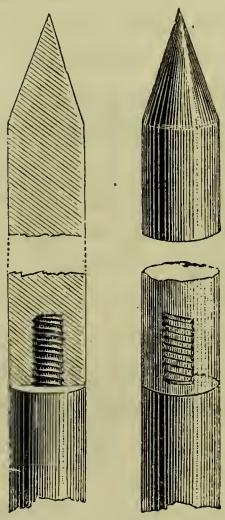


Fig. 570. — Paratonnerre.

des édifices; on distingue alors deux parties : le paratonnerre, qui est la tige, s'élevant au-dessus du toit, et le conducteur qui relie celle-ci au réservoir commun.

Le paratonnerre est une tige de fer de hauteur variable, de 3 à 5 mètres en général, et de $0^m,02$ de diamètre; elle est terminée à sa partie supérieure (fig. 570) par une pièce de cuivre qui y est solidement vissée, qui a le même diamètre et dont la hauteur est est de $0^m,20$ à $0^m,25$; elle se termine par un cône de 30° d'ouverture environ; le paratonnerre est relié à sa partie inférieure avec le conducteur qui est constitué par un câble en fil de fer ou plutôt par une série de barres de fer; l'ensemble ne doit présenter aucune solution de continuité, aussi convient-il de recouvrir tous les joints de nœuds

de soudure. Ce conducteur, comme le paratonnerre, peut être traversé par de grandes quantités d'électricité; aussi il faut lui donner une section suffisante. On n'a pas d'exemple qu'une barre de fer de $0^m,015$ de côté ait été amenée à l'incandescence par le passage de la foudre; on prend donc des barres de fer ayant $0^m,015$ ou mieux $0^m,020$ de côté.

La partie inférieure du conducteur doit être largement en relation avec une couche conductrice constituant vraiment le réservoir commun. S'il est possible, il faudra le descendre jusqu'à une nappe d'eau qui ne tarisse pas, alors même qu'il faudrait pour arriver à ce résultat prolonger le conducteur à une certaine distance du bâtiment; si l'on a une couche qui reste toujours humide, on peut à la rigueur s'en contenter; on y creuse alors une tranchée que l'on emplit de charbon de bois ou de braise et où aboutit la partie inférieure du conducteur; mais c'est là un pis-aller qu'il ne faut accepter qu'en cas de nécessité absolue.

Il importe de remarquer qu'il ne suffirait pas de faire aboutir le conducteur dans une citerne, fût-elle même toujours remplie d'eau; il faut, de toute nécessité, que le conducteur soit en communication avec le réservoir commun, et non pas seulement avec de l'eau.

On a obtenu, à l'étranger, de bons résultats en reliant les parties inférieures des paratonnerres avec les conduites d'eau; bien qu'il ne semble pas y avoir d'inconvénient, cette solution n'est pas acceptée en France.

703. — Lorsqu'il s'agit de garantir un édifice d'une certaine étendue, on emploie plusieurs paratonnerres dont le nombre et la position n'ont rien d'absolument déterminé; chaque paratonnerre présente un conducteur spécial jusqu'à la base de l'édifice; ces conducteurs peuvent être réunis en un conducteur unique de large section pour se relier à la couche aquifère.

Il est bon, en outre, que les tiges des divers paratonnerres soient reliées à leur base par un conducteur métallique qui règne sur le toit.

Si dans la construction qu'il s'agit de protéger, il existe des pièces métalliques de quelque étendue, des réservoirs, des planchers ou des combles en fer, il est nécessaire de les relier métalliquement au conducteur. Faute de cette disposition, il pourrait éclater des étincelles, même à travers les murs, entre ces pièces et le conducteur, étincelles qui amèneraient un véritable foudroiement, secondaire pour ainsi dire.

La nécessité absolue d'une continuité métallique parfaite entre

toutes les pièces, depuis le sommet du paratonnerre jusqu'à la couche aquifère, est la condition essentielle; pour éviter les accidents qui pourraient résulter de ce que cette condition n'est pas remplie, il serait bon de pratiquer de temps à autre un véritable essai de la conductibilité électrique du conducteur; c'est là, d'ailleurs, une pratique qui commence à s'établir.

Il arrive quelquefois qu'à la suite d'un orage, la pointe du paratonnerre est fondue; le paratonnerre agit encore cependant d'une manière utile. Son action est moins préventive et il décharge moins rapidement les nuages orageux; mais dans le cas où la foudre viendrait à tomber, l'électricité suivrait de préférence, pour rétablir l'équilibre entre le nuage et le réservoir commun, le chemin peu

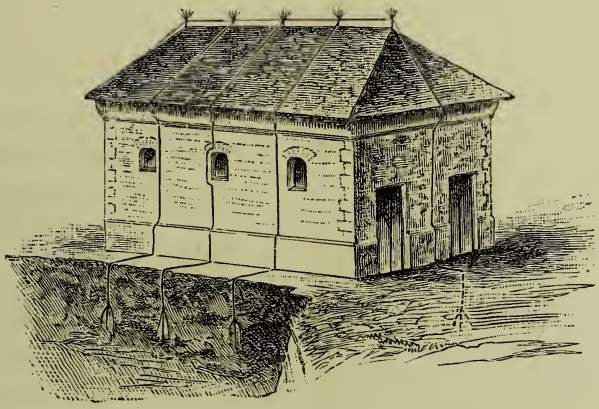


Fig. 571. — Paratonnerre Melsens.

résistant que lui offre le paratonnerre et le conducteur, d'autant que le sommet de la tige est plus voisin du nuage que les autres points de la construction.

704. Paratonnerres système Melsens. — M. Melsens a proposé de remplacer les paratonnerres tels qu'ils ont été construits jusqu'à présent par un autre système qui a été appliqué sur divers édifices et notamment à l'hôtel de ville de Bruxelles. Dans ce système, au lieu d'avoir un petit nombre de tiges élevées, on garnit toutes les parties saillantes de l'édifice, angles, pignons, clochetons, etc., de petites aigrettes formées de tiges de cuivre rouge de $0^m,006$ de diamètre et terminées en pointe (fig. 571). Toutes ces aigrettes sont reliées à un réseau métallique, formé de conducteurs de section relativement faible, descendant jusqu'à la partie inférieure et de

tiges métalliques horizontales ou obliques reliant les diverses aigrettes; ce réseau est relié intimement à la couche aquifère.

L'action est la même que celle que nous avons expliquée plus haut : le bâtiment est garanti dans chacune de ses parties. La protection paraît être très satisfaisante. L'avantage de ce système, c'est principalement son prix peu élevé. Cet avantage est réel pour les cas où on aurait appliqué à tout prix un système de paratonnerres comme il arrive pour les bâtiments publics; mais de plus, il permet d'en établir dans nombre de cas où la dépense aurait fait hésiter à adopter le système classique.

CHAPITRE VII

APPLICATIONS SPÉCIALES DE L'ÉLECTRICITÉ A LA PHYSIOLOGIE ET A LA MÉDECINE

705. — Les relations de l'électricité avec les sciences biologiques sont nombreuses et, malheureusement, on n'est pas encore complètement renseigné sur tous les points. Il n'est pas douteux que les êtres vivants sont le siège de phénomènes électriques qui n'ont été étudiés qu'imparfaitement jusqu'à présent et dont on ne connaît presque rien de certain, de précis. Nous n'avons pas d'ailleurs à nous occuper de ce côté de la question.

Mais, d'autre part, l'électricité a été employée sous les formes les plus variées à l'étude des phénomènes physiologiques; elle est utilisée également, d'une manière un peu incertaine, il faut le reconnaître, comme moyen thérapeutique. Les appareils qui sont utilisés dans ces différents cas auraient pu être décrits dans les chapitres précédents; quelques-uns qui n'ont pas besoin d'une adaptation spéciale pour ces usages particuliers y figurent en effet; tels sont, par exemple, les appareils enregistreurs en général. Mais il nous a semblé qu'il y avait intérêt à réunir dans un même chapitre les appareils principaux qui sont utilisés en physiologie et en médecine. Outre que cette disposition facilite les recherches, elle fournissait l'occasion d'insister sur un certain nombre de points sur lesquels règnent trop généralement des idées incomplètes ou même absolument fausses.

Au point de vue des moyens de l'application de l'électricité, ce chapitre ne saurait donc avoir d'homogénéité; les questions qu'il renferme ne sont cependant pas complètement indépendantes et elles répondent à un même ordre d'idées en tant que but.

706. Emploi de l'électricité statique. — On ne possède aucune

notion précise sur la manière dont agit l'électricité statique, si ce n'est lorsque l'on provoque des étincelles qui amènent des contractions musculaires. Il ne paraît pas douteux cependant qu'il y a une action.

L'électricité est utilisée sous forme de bains; le malade, assis sur un siège porté par des pieds isolants, est mis en communication avec les conducteurs d'une tige ou d'une chaîne métallique; pendant que la machine fonctionne il est donc amené au même potentiel que celle-ci. Il se produit d'ailleurs un mouvement de l'électricité, car malgré l'isolement le corps perd une partie de sa charge, soit par les supports, soit surtout par le contact avec l'air. On peut même provoquer ce mouvement en un point donné en approchant une pointe conductrice reliée au sol, ou une brosse métallique également reliée au sol; dans quelques cas on se sert d'une tige terminée par une boule, ce qui donne lieu à des étincelles, tandis que les pointes donnent lieu à un écoulement peu sensible.

On emploie peu les condensateurs.

On fait usage surtout de machines Carré qui sont d'un bon usage; il est bon de pouvoir les faire manœuvrer par un moteur spécial, machine à gaz, moteur à eau ou machine dynamo-électrique.

La machine construite par la maison Bréguet d'après les idées de Wimshurst (la théorie, mal connue, la rapproche du genre des machines de Holtz) présente l'avantage d'être peu sensible à l'action de l'humidité; nous la décrivons ci-après dans l'appendice.

707. Considérations générales sur l'emploi des courants en physiologie et en médecine. — Les courants électriques peuvent être utilisés pour produire des effets physiologiques ou thérapeutiques en raison des modifications qu'ils produisent dans les organes qu'ils traversent : les effets sont d'ailleurs différents suivant qu'on les produit par le passage continu du courant ou par la fermeture ou la rupture brusque du circuit que celui-ci traverse.

Nous nous occuperons d'abord de l'action continue.

Nous ignorons lorsqu'un courant traverse un tissu vivant, muscle ou nerf, par exemple, s'il a une action physiologique particulière, action résultant du passage même de l'électricité; mais ce qui n'est pas douteux, c'est qu'il y produit des actions analogues à celles auxquelles il donne naissance d'une manière générale : il peut provoquer des actions thermiques, mais elles sont vraisemblablement négligeables eu égard à la faible intensité des courants que l'on emploie et à la masse considérable des parties parcourues par ces courants. Mais il n'est pas douteux qu'il ne se produise aussi des

actions chimiques se manifestant aisément par des effets appréciables aux points par lesquels le courant entre et sort; en outre, des effets de même nature doivent se produire sur tout le trajet parcouru par l'électricité. Dans ce cas, comme dans les phénomènes généraux de l'électrolyse, on ne peut admettre que ce soit seulement en ces points extrêmes que l'action chimique se produit, et l'hypothèse de Grothus (131) est applicable : sur tout le parcours de l'électricité il y a des décompositions et recompositions moléculaires; c'est, sans doute, ces modifications intimes qui sont la cause des effets produits, et cela d'autant plus probablement que ces modifications ne sont pas limitées au temps où le courant agit directement. Après la cessation du courant, il se manifeste des phénomènes de polarisation, comme nous l'avons dit pour l'électrolyse en général : ces phénomènes peuvent être mis en évidence par ce fait que, refermant le circuit après avoir supprimé la pile, on reconnaît l'existence d'un courant de sens contraire à celui qui avait agi précédemment.

Ce sont ces modifications moléculaires qui, permettant de nouveaux groupements moléculaires, changeant, par conséquent, les conditions de nutrition des tissus, expliquent les effets que produisent certainement les courants, effets qui peuvent amener des résultats favorables s'ils sont appliqués convenablement. Il ne nous semble pas qu'il y ait lieu de chercher d'autre explication aux phénomènes observés.

Les effets chimiques qui se produisent au contact des électrodes et qui sont directement appréciables peuvent être utilisés et nous en parlerons plus loin; mais ils peuvent être un inconvénient, comme nous aurons l'occasion de l'expliquer ci-après.

708. — On ignore les lois qui régissent exactement les actions physiologiques ou thérapeutiques dont nous parlons; ces actions sont liées certainement à l'intensité du courant et augmentent avec elle, mais non pas proportionnellement. Bien que nous ne puissions donner une loi exacte, nous pensons d'après des recherches personnelles qu'elles croissent plus rapidement que l'intensité et peut être proportionnellement au carré de l'intensité (ce qui pour un organe donné, de résistance R, semblerait indiquer que c'est l'*énergie* mesurée par RI^2 qui régirait ces actions). La durée de l'action intervient aussi, au moins pour une part, non pas pour la sensation spéciale que l'on éprouve, sensation qui pour des courants modérés, 10 milliampères par exemple, ne paraît pas varier avec le temps; mais peut être pour les effets thérapeutiques, pour certains d'entre

eux au moins, de telle sorte que, dans une certaine mesure, on pourrait obtenir le même effet d'un courant déterminé agissant dans un certain temps ou d'un courant plus faible agissant dans un temps plus long; ce serait dans ce cas la quantité d'électricité qui interviendrait : nous ne sommes pas convaincu qu'il en soit ainsi, mais nous ne croyons pas pouvoir affirmer le contraire.

Quoi qu'il en soit ailleurs, ce qui est certain c'est que les effets varient dans le même sens que l'intensité du courant.

Les effets des courants sur les muscles s'accompagnent d'une sensation particulière qui peut arriver à devenir une douleur intolérable lorsque l'intensité atteint une certaine valeur. Bien qu'il soit impossible de donner un chiffre précis, on peut considérer que, sauf des cas exceptionnels, on ne saurait dépasser l'intensité de 20 milliampères sans inconvénient; cette valeur ne doit pas même être atteinte, en général, si l'action se produit dans le voisinage des centres nerveux. Dans certains cas où il s'agit d'organes peu sensibles présentant des tumeurs qu'il faut faire disparaître (tumeurs fibreuses de l'utérus) M. le Dr Apostoli a pu employer des courants de 60 milliampères, sans inconvénients.

709. — L'intensité du courant qui traverse une portion déterminée de circuit est liée à la résistance de ce circuit : il n'est donc pas sans intérêt d'avoir quelques notions sur la résistance des tissus, des organes. Lorsque l'on veut faire passer un courant à travers une partie du corps d'un homme ou d'un animal on trouve que la résistance est toujours notable et quelquefois considérable : cette résistance comprend deux parties : la résistance des tissus traversés qui dépend de leur nature, de la distance qui sépare les électrodes, l'espace dans lequel le courant se répand entre ces points, car l'électricité ne suit pas une ligne géométrique, mais se diffuse, d'une manière indéterminée au moins jusqu'à présent; — et, d'autre part, la résistance au passage entre les électrodes et les tissus, résistance due à l'épiderme et à la couche de matière grasse qui le recouvre; cette résistance très grande quand la peau est sèche, diminue notablement si la peau est humide, si on l'a mouillée avec de l'eau salée surtout, et plus encore si par un lavage au savon ou à l'alcool on a enlevé la couche de matière grasse.

Nous croyons qu'avec les électrodes employées généralement, même entre des points rapprochés, la résistance doit descendre rarement au-dessous de 1000 ohms et peut atteindre, entre les deux mains par exemple, 10 000 à 12 000 ohms; on a même indiqué le chiffre de 30000 ohms qui paraît un peu fort cependant.

710. — Les résistances que l'on rencontre ainsi généralement étant grandes par rapport à la résistance des piles, il résulte de la discussion générale (119) qu'il y a toujours intérêt à monter en série les éléments dont on dispose.

Il va sans dire que, pour un même nombre d'éléments l'intensité du courant, et par suite aussi l'énergie disponible dans la partie du circuit dont on dispose, seront d'autant plus considérables, que les éléments auront une grande force électromotrice et seront le moins résistants possible[1].

Mais il faut reconnaître que la résistance de la pile est presque toujours petite en comparaison de la résistance extérieure, alors même que les éléments sont petits, de telle sorte que, s'il est sans intérêt d'employer des éléments résistants, les inconvénients ne sont pas grands et qu'on peut adopter des éléments de petites dimensions commodes à cause du moindre volume qu'ils présentent.

711. — Par suite de la faible intensité des courants employés les piles ne se polarisent pas très vite, cependant il convient d'employer des éléments à courants aussi constants que possible : le pile Daniell, la pile Marié-Davy, la pile au chlorure d'argent, la pile Leclanché, la pile au bichromate de potasse même peuvent être utilisées. En tout cas, la pile de Bunsen doit être absolument proscrite, à causes des vapeurs nitreuses qu'elle dégage, à moins que, ce qui se présente rarement dans la pratique, elle ne puisse être placée à l'air libre sous un abri largement ouvert.

Il est même possible d'employer des accumulateurs ou des piles thermo-électriques, bien que, jusqu'à présent, les modèles dont on dispose ne soient pas encore très pratiques. Ce qui est important à signaler et ce sur quoi il serait à peine nécessaire d'insister si des opinions gravement erronées n'avaient été émises à ce sujet, c'est que la nature de la source du courant est tout à fait indifférente,

1. C'est par suite d'une interprétation erronée de certaines formules et d'une conception fausse de la production du courant dans les piles que quelques auteurs ont cru à la nécessité que les piles médicales fussent très résistantes : il n'en est rien comme il est facile de s'en convaincre.

Soit une pile de n éléments de force électromotrice e et de résistance π et soit Λ la résistance extérieure représentée par la partie traversée par le courant. La valeur de de l'intensité I du courant et celle de l'énergie ΛI^2 sont données par les formules :

$$I = \frac{ne}{n\pi + \Lambda} \text{ et } \Lambda I^2 = \frac{n^2 e^2 \Lambda}{(n\pi + \Lambda)^2}$$

qui montrent que pour une valeur donnée de n ces deux quantités croissent avec e et décroissent quand π augmente.

qu'il n'y a pas d'éléments qui donne surtout des actions chimiques et d'autres qui produiraient plutôt de la chaleur; à égalité de force électromotrice et de résistance, les effets sont rigoureusement les mêmes quelle que soit la manière dont la force électromotrice et la résistance ont été obtenues.

Nous devons ajouter, pour rendre compte des précautions qu'il est nécessaire de prendre dans l'emploi des courants continus que toute variation brusque de potentiel, correspondant à l'établissement ou la cessation rapide, ou à une augmentation ou une diminution rapide également, fait naître des contractions et provoque des sensations douloureuses qu'il convient d'éviter.

712. Description d'une pile médicale. — Nous admettrons que cette pile est destinée seulement à l'application des courants continus agissant par leur action physiologique directe : nous dirons plus tard les modifications qu'elle doit présenter si elle est destinée également à servir à l'électrolyse ou au galvanocautère.

Le nombre des éléments qu'il convient de choisir est difficile à préciser; dans une pile installée à demeure il faut au moins 50 éléments et il peut être utile d'en avoir 100 pour quelques cas particuliers. Dans les appareils portatifs où, naturellement, les conditions d'espace et de poids interviennent en première ligne, on peut prendre de 24 à 50 éléments.

Dans les piles fixes, il y a intérêt à prendre des éléments de dimensions ordinaires, de grandes dimensions même; il faut prendre des éléments petit modèle pour les piles transportables. La seule différence c'est que dans les secondes les zincs et les liquides s'useront plus rapidement et qu'il faudra plus souvent les renouveler.

Une pile médicale doit absolument être munie d'un galvanomètre étalonné, d'un modèle quelconque d'ailleurs, qui sera toujours traversé par le courant dès que la pile fonctionnera et qui non seulement fera savoir si le courant passe effectivement ou non, mais indiquera son sens et surtout fera connaître son intensité. Cette dernière condition est indispensable, car il n'est plus admissible que l'on applique l'électricité au hasard : c'est un agent thérapeutique qui peut et qui doit être employé à des doses déterminées dans chaque cas, si on veut lui faire produire tous les effets que l'on peut en attendre.

La pile devra être munie d'un commutateur qui, sans rien changer à la disposition des fils conducteurs et des électrodes permet de changer le sens du courant dans l'organe traversé. Il est très important de remarquer que dès que le courant atteindra 2 à 3 milliam-

pères, il ne faudra pas faire agir le commutateur sans interrompre le courant au préalable; sans cela, il en résulterait pour le patient une secousse vive et une sensation désagréable produites par la variation brusque de potentiel.

Enfin il doit également toujours y avoir sur le trajet du courant un interrupteur destiné à faire cesser brusquement et à rétablir rapidement le courant, à volonté. En général, l'interrupteur se compose d'une lame de ressort munie d'un bouton; au repos, par l'élasticité du ressort, le circuit se trouve naturellement fermé, le courant passe; lorsque l'on appuie sur le bouton, la lame de ressort est écartée, le circuit est ouvert et le courant cesse. Les choses reviennent au premier état lorsque l'on abandonne le bouton à lui-même, le ressort revient à sa position primitive et ferme le circuit. L'interrupteur ne doit être employé que dans des conditions bien déterminées et, en général, il n'est pas appelé à servir dans les cas où l'on utilise les courants continus. Nous dirons plus tard dans quelles conditions on doit le faire fonctionner et quelles modifications alors il pourrait être intéressant de lui apporter.

En tout cas, si l'on s'aperçoit que le courant produit des effets fâcheux, il faut bien se garder de l'arrêter en se servant de l'interrupteur : la variation brusque de potentiel qui en résulterait pourrait accroître gravement le danger; il faudrait affaiblir l'intensité du courant aussi vite que possible mais graduellement par l'un des procédés que nous allons indiquer ci-après.

713. — Pour faire varier l'intensité du courant, on emploie deux procédés différents qui d'ailleurs peuvent être utilisés concurremment; on change la résistance du circuit, ou bien on fait varier la force électro-motrice en employant des éléments en nombre variable.

Il est très important de remarquer que quel que soit le moyen employé, le résultat est le même et qu'il n'y a aucune différence à diminuer l'intensité en augmentant la résistance ou en diminuant le nombre des éléments. C'est une erreur grave de penser que dans le premier cas on arrive à une intensité moindre en conservant une grande tension tandis que dans le second cas on affaiblit à la fois l'intensité et la tension. Outre que l'expression de *tension* ne correspond pas à une notion bien définie, il y a une confusion qu'il est indispensable d'éviter.

Les effets produits dans l'organisme par les courants continus ne peuvent dépendre que de trois éléments : l'intensité du courant, la différence de potentiel, ou l'énergie dépensée sur le trajet parcouru par le courant.

L'intensité du courant est la même dans tout le circuit; les résultats dépendant de cet élément sont donc complètement indépendants de la manière dont on parvient à modifier l'intensité.

La différence de potentiel qui est intéressante à considérer n'est pas, comme certains auteurs semblent le croire, celle qui existe entre les deux pôles de la pile lorsque le circuit n'est pas fermé, qui correspond à la force électro-motrice de cette pile, non plus que celle qui existe entre les électrodes de la pile quand le courant passe, mais seulement celle qui existe entre les points d'entrée et de sortie du courant dans l'organisme. On peut bien faire varier l'intensité du courant sans changer la force électromotrice de la pile; mais tout changement de l'intensité entraîne nécessairement une variation corrélative de la différence de potentiel entre le point où le courant pénètre dans l'organisme et celui où il en sort, de telle sorte qu'il n'est pas possible de diminuer l'intensité sans diminuer exactement dans le même rapport cette différence de potentiel.

Ceci résulte évidemment de ce que pour une partie quelconque du circuit on a toujours $I = \frac{\varepsilon}{r}$, I étant l'intensité, r la résistance de cette partie et ε la différence de potentiel entre ses deux extrémités. Dans le cas qui nous occupe, la résistance de la partie traversée r restant la même, on voit immédiatement que I et ε varient proportionnellement.

Dès lors, que le courant soit affaibli par un procédé ou par un autre, il y aura nécessairement une diminution corrélative de la différence de potentiel.

Cette même conclusion s'imposerait encore si on admettait que le courant agit proportionnellement à l'énergie dépensée sur le trajet considérée : on sait en effet que, pour une résistance invariable r, cette énergie est représentée par rI^2. On ne peut donc modifier la valeur de l'intensité du courant sans changer en même temps et dans le même sens l'énergie dépensée.

En résumé, on ne peut diminuer l'intensité d'un courant qui traverse un conducteur donné sans diminuer en même temps toutes les données desquelles peuvent dépendre les effets produits par les courants, et cela quelle que soit la manière dont on parvient à provoquer cet affaiblissement.

714. — On peut donc, lorsque l'on veut faire varier l'intensité d'un courant, employer le procédé qui sera le plus commode, l'effet obtenu sera toujours le même.

Deux méthodes sont principalement usitées dans les appareils médicaux.

La première méthode qui comporte l'emploi de pièces spéciales est peu employée pour les appareils portatifs : elle consiste dans l'adjonction de bobines de résistance ou de rhéostat (288) de modèles divers qui permettent d'introduire dans le circuit des longueurs variables de fils. Au début de chaque opération, on met dans le circuit la plus grande résistance possible, ce qui donne un courant presque nul; on diminue progressivement la résistance, ce qui augmente l'intensité du courant progressivement aussi, jusqu'à ce que l'on ait atteint la valeur jugée nécessaire.

Dans quelques cas, la résistance est représentée par une colonne liquide : une dissolution de sulfate de cuivre est placée dans un tube, ou plutôt une éprouvette, dans laquelle se trouvent deux plaques de cuivre auxquelles aboutissent les fils conducteurs : l'une de ces plaques est fixe au fond de l'éprouvette, l'autre est portée par une tige mobile qui permet de l'enfoncer plus ou moins de manière à faire varier la distance des deux plaques et en même temps la résistance. C'est un véritable rhéostat liquide; il faut toujours au début que les plaques soient le plus éloignées possible pour avoir le courant presque nul au moment de l'application.

Il est clair que les éléments, restant toujours tous dans le circuit lors des applications du courant, s'useront tous de la même façon et devront tous être renouvelés en même temps. Il ne faudrait pas croire que, à cet égard, il y aurait un intérêt réel à employer la disposition qui consiste à se servir seulement du nombre d'éléments nécessaire sans introduire de résistances supplémentaires : les éléments ne s'useront pas tous, il est vrai, mais ceux qui seront employés s'useront plus que dans le cas précédent. Comme alors il est impossible pratiquement d'obtenir que tous les éléments travaillent exactement de la même façon pendant une période comprenant des applications variées, l'usure est inégale et ceux qui ont été utilisés le plus souvent et le plus doivent être renouvelés d'abord.

715. — La variation du courant peut s'obtenir par le changement du nombre des éléments employés : quelques dispositions spéciales doivent être prises dans ce cas : il faut en effet que l'introduction d'un ou plusieurs éléments dans le circuit, ou leur suppression, se fasse sans interrompre le courant et d'une manière graduelle pour éviter les effets désagréables résultant de la variation brusque de potentiel. L'expérience a montré que ces variations sont à peine senties si elles ne dépassent pas 2 à 3 volts, c'est-à-dire que l'on peut sans inconvénient introduire ou supprimer les éléments deux par deux.

Des dispositions diverses ont été adoptées; la suivante, qui constitue le collecteur double de M. Gaiffe (fig. 572), est d'un emploi commode.

Les éléments sont montés en série; des bornes qui correspondent à la jonction du pôle + d'un élément de rang impair au pôle — de l'élément suivant de rang pair partent deux fils qui vont aboutir à deux chevilles en cuivre appartenant chacune à un cadran distinct comprenant ainsi autant de chevilles plus une qu'il y a de paires d'éléments. Chaque cadran est muni d'une manette M mobile autour du centre et dont l'axe métallique est relié par un fil métallique souple, recouvert de soie, à l'une des électrodes qui sera appliquée sur la peau.

D'après la position des fils, on reconnaît aisément (fig. 573) que

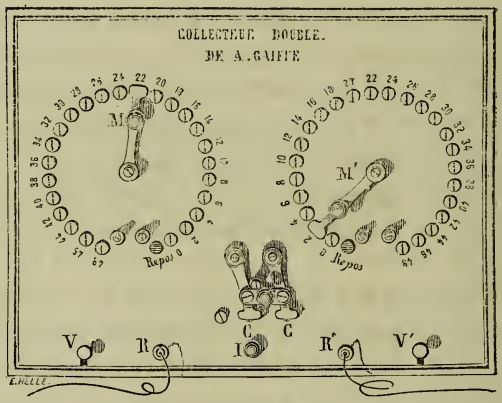


Fig. 572. — Collecteur double. (*Gaiffe.*)

lorsque le circuit sera fermé par l'interposition d'un conducteur entre les électrodes P′ et N′, il sera traversé par un courant si les manettes A, B sont appuyées sur deux chevilles d'ordre différent; — que le nombre des éléments qui produisent le courant est représenté par la différence des chiffres correspondant aux chevilles sur lesquelles reposent les manettes; — que le sens pourra changer à volonté suivant que ce sera sur l'un ou l'autre cadran que se trouvera la manette correspondant au chiffre le plus élevé.

Par cette disposition, on peut, lorsque l'on ne fait pas usage de toute la pile, introduire dans le circuit les éléments situés au commencement, au milieu ou à la fin de la pile; de cette manière on arrive à user plus régulièrement les éléments. Dans le cas où l'on fait usage d'un collecteur simple (dont il existe d'ailleurs différents

modèles) les éléments situés au commencement de la pile fonctionnent chaque fois que la pile est en action et par suite s'usent plus vite que les autres.

Pour éviter les effets désagréables, il faut toujours faire varier progressivement l'intensité du courant; c'est-à-dire qu'il faut introduire ou supprimer les éléments deux par deux sans qu'il y ait interruption. Pour satisfaire à cette condition, les manettes qui viennent établir les contacts sur les chevilles des cadrans sont établies en forme de T, c'est-à-dire qu'elles présentent une partie

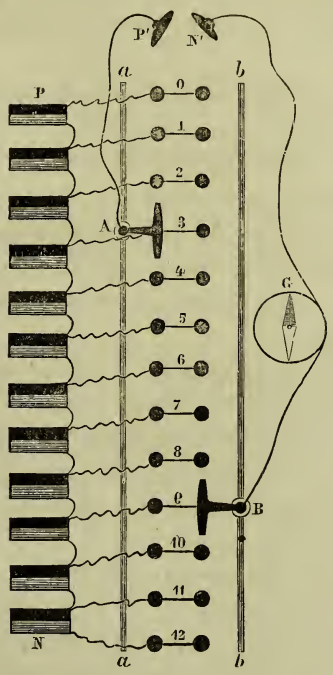


Fig. 573. — Principe du collecteur double.

élargie à l'extrémité périphérique; cette partie étant d'une largeur plus grande que l'intervalle qui sépare deux chevilles, il en résulte que le contact s'établira avec une cheville avant qu'il ait cessé avec l'autre; il n'y aura donc jamais interruption.

On peut rencontrer d'autres formes de collecteurs, mais ils ne diffèrent pas au fond et ils doivent toujours satisfaire aux mêmes conditions générales.

716. Du mode d'emploi des courants. — Lorsque l'on veut faire une application de courants continus entre deux points déterminés,

il faut s'assurer à l'avance que la pile fonctionne; on vérifiera que le galvanomètre est dévié lorsque l'on a réuni les électrodes et que l'on met les manettes sur deux chevilles différentes quelconques.

Les électrodes ont des formes variées : tantôt ce sont des cylindres creux en laiton, à l'intérieur desquels on met des éponges que l'on a préalablement trempées dans l'eau salée; tantôt ce sont des tampons en charbon, de forme sphéroïdale, recouverts de peau que l'on a également imbibée d'eau salée avant de les appliquer sur la peau. Ces électrodes auxquelles aboutissent les extrémités des fils souples, dont les autres extrémités sont reliées à la pile, sont montées sur des manches de bois, manches isolants que l'opérateur tient à la main.

Quelquefois, on prend pour électrodes de larges plaques d'amadou, de larges lames métalliques recouvertes de peau, imbibées d'eau salée, ou de la terre glaise également mouillée d'eau salée (Apostoli) et que l'on applique sur la peau sur une assez grande étendue; l'emploi de ces électrodes de grandes dimensions a pour effet de diminuer la résistance au passage et de diminuer les actions locales qui se produisent en ces points de passage en les répartissant sur une plus large surface.

Si l'on veut agir sur un organe interne, on y introduit un conducteur recouvert par une enveloppe isolante, découvert seulement à son extrémité et communiquant avec un des pôles de la pile, l'autre étant relié à une large électrode que l'on place sur la peau.

Il est bon, avant l'application des électrodes d'avoir mouillé la place sur laquelle elles s'appuieront, de l'avoir imbibée d'eau salée et même, au besoin de l'avoir savonnée.

Les électrodes mises en place, on fera passer le courant dans le sens indiqué; on peut faire varier ce sens soit par l'interversion des électrodes, soit par le déplacement du commutateur, soit en avançant le plus la manette de l'un ou de l'autre cadran. On fera croître le courant progressivement en déplaçant ces manettes jusqu'à ce que le galvanomètre indique la valeur de l'intensité qui a été déterminée à l'avance d'après la nature de l'affection, les dispositions du malade et les effets que l'on veut obtenir. Il faut pendant toute la durée du passage du courant surveiller le galvanomètre : il arrive assez souvent en effet que l'intensité du courant s'accroisse sans que l'on ait changé le nombre des éléments; cela tient à ce que la peau s'imbibe et qu'il peut s'y produire une légère action chimique, deux actions qui diminuent la résistance : il faudra alors réduire le nombre des éléments employés.

Quelquefois, au contraire, le courant diminue d'intensité et il faut alors le ramener à la valeur indiquée en augmentant le nombre des éléments employés; cet affaiblissement du courant peut provenir soit de la polarisation de la pile, soit des forces contre-électromotrices qui prennent naissance dans l'organisme à la suite des actions chimiques qui s'y produisent.

Lorsque l'on veut avoir une application locale de l'électricité, on emploie avec avantage des électrodes concentriques imaginées par le Dr Boudet de Pâris, et que nous décrivons plus loin (738).

717. Électrodes impolarisables. — L'électricité est employée fréquemment en physiologie pour provoquer certaines actions que nous n'avons pas à étudier ici ; les courants continus sont quelquefois utilisés, rarement cependant. Les moyens de production, de mesure, les procédés employés pour obtenir des variations sont absolument les mêmes que ceux que nous venons d'étudier; nous n'insisterons donc pas.

Mais il est quelques précautions particulières que nous devons signaler et sans l'emploi desquelles on risque de faire des erreurs graves.

Dans toutes les expériences relatives aux actions électriques dans les muscles ou les nerfs, par exemple, qu'il s'agisse des effets produits par l'électricité ou qu'il s'agisse au contraire des courants produits par ces organes, il faut éviter de laisser se produire des phénomènes de polarisation qui masqueraient les effets, qui affaibliraient ou même annuleraient ces courants.

S'il s'agit de faire agir un courant sur un nerf, on prend pour électrodes deux tubes de verre rétrécis à leur extrémité et bouchés par des tampons d'argile imbibée d'eau salée, tampons auxquels on donne la forme la plus commode à leur partie libre : les tubes sont remplis d'une dissolution saturée de sulfate de zinc ; des tiges de zinc amalgamé plongent dans le liquide et, par l'autre extrémité, sont reliées aux rhéophores de la pile.

Dans des expériences analogues sur les muscles on emploie souvent une disposition indiquée par M. Du Bois-Reymond. Dans deux vases en verre rempli d'une dissolution saturée de sulfate de zinc, on plonge deux lames de zinc amalgamé qui servent de rhéophores d'une part ; d'autre part, on dispose, avec du papier buvard coupé en bandes que l'on superpose, des supports que l'on imbibe du même liquide ; sur ces supports, on met l'organe à étudier ou, ce qui vaut mieux (de crainte que la dissolution de sulfate de zinc n'agisse sur les tissus) on place sur ces supports de petites masses

d'argile imbibée d'eau salée sur lesquelles on fera reposer l'organe.

Malgré toutes les précautions, on ne fait que diminuer la polarisation sans l'annuler tout à fait. Aussi convient-il, après chaque expérience, de dépolariser les électrodes; pour cela, supprimant l'organe étudié, on réunit les électrodes par une bandelette de papier.

Dans quelques modèles, les vases en verre sont supprimés et remplacés par des vases en zinc amalgamé qui sont directement en communication avec les rhéophores.

718. Des courants interrompus ; des variations de potentiel. — Les variations brusques des courants appliqués à des êtres vivants produisent des effets très considérables qui se traduisent par des mouvements, des contractions, et par de la douleur, très vive quelquefois. Si les variations sont très considérables, la mort même peut survenir. S'il s'agit de muscles détachés depuis peu de l'animal, les mouvements et les contractions se produisent également.

Enfin, si les variations se produisent très nombreuses et très rapides il peut survenir des phénomènes tétaniques.

Nous n'avons à nous occuper ici que des procédés que l'on peut employer pour obtenir ces variations du courant.

Le moyen le plus simple consiste à employer un procédé analogue à celui qui existe dans certaines piles médicales; on peut alors, à la main, produire ces interruptions à volonté, leur donnant la fréquence et la durée que l'on juge convenables. Mais cette méthode ne peut produire de variations ni très fréquentes ni très brusques ; de plus ce qui est nécessaire dans certaines expériences on ne peut les produire toujours identiques à elles-mêmes. Aussi le plus souvent emploie-t-on des procédés automatiques pour produire ces variations : nous décrirons les principales dispositions adoptées plus loin, à propos des appareils d'induction où elles servent beaucoup plus fréquemment que pour l'interruption de courants continus.

719. — Des méthodes un peu spéciales ont été proposées pour permettre d'obtenir des effets que l'on pourrait, pour ainsi dire, doser à volonté. M. le professeur Chauveau a indiqué le procédé qu'il a employé pour arriver à ce résultat (1873).

Une pile de Daniell de 20 éléments est montée en série : ses pôles sont reliés par un fil fin de platine présentant une assez grande longueur et plié en zigzags égaux (pour occuper un moindre espace) au nombre de 20 par exemple : les sommets situés d'un même côté sont seuls utilisés : on sait que la différence de potentiel de chacun

d'eux au suivant est partout la même ; et si l'on met en contact avec le sol le sommet médian, les sommets suivants dans un sens, puis dans l'autre présenteront avec celui-ci des différences de potentiel, qui sont entre elles comme les nombres 1, 2,... 10 et —1, —2... —10. On a d'autre part une sphère isolée d'un assez grand diamètre à laquelle aboutissent deux fils ; par l'un, elle sera mise en communication avec l'un des sommets et prendra sinon instantanément, au moins avec une extrême rapidité le même potentiel que ce sommet dès que la communication sera établie ; sur ce fil sont intercalés un interrupteur automatique fonctionnant avec régularité et l'animal sur lequel on expérimente. Le second fil fixé à la sphère peut être mis en communication avec le sol.

La sphère ayant été déchargée et le fil étant relié à l'un des sommets, lorsque l'on fermera le circuit à l'aide du rhéotome, l'animal sera traversé par un flux d'électricité qui durera le temps très court nécessaire à obtenir la charge complète de la sphère ; l'action cessera quand ce résultat sera atteint, elle est indépendante de la marche plus ou moins régulière de l'interrupteur. On déchargera la sphère en la mettant en communication avec le sol et l'appareil sera prêt à fonctionner de nouveau quand agira le rhéotome, l'action se reproduisant identiquement si l'on n'a rien changé à la disposition des fils ; si, au contraire, le fil conducteur est en contact avec un autre sommet, il y aura une action due à une autre quantité d'électricité les quantités en jeu dans les divers cas étant proportionnelles aux potentiels des sommets utilisés.

Cette méthode de M. Chauveau qui permet d'obtenir des effets identiques à volonté ou des effets dans des rapports déterminés à l'avance lui a donné d'intéressants résultats.

720. — M. Chauveau avait aussi indiqué une autre méthode qui a été utilisée spécialement par M. Boudet de Pâris (1881), elle consiste dans l'emploi d'un condensateur que l'on charge à l'aide d'une pile dont on connaît la force électromotrice que l'on peut faire varier à volonté. On charge le condensateur en mettant ses armatures en rapport respectivement avec les deux pôles de la pile ; puis on supprime ces contacts et on établit le contact de ces armatures avec les parties qu'il s'agit d'exciter. On peut disposer une clef qui, par la simple pression d'un bouton, établit et rompt la communication dans l'ordre convenable. Il importe de remarquer que, le circuit de la pile n'étant jamais fermé, celle-ci ne peut se polariser.

Cette méthode fournit également d'excellents résultats et il serait à désirer que les physiologistes se décidassent à faire usage de ces

procédés qui permettent des mesures numériques parfaitement définies et bien déterminées et qui donnent même la valeur en travail mécanique de l'énergie utilisée [1].

721. Des courants induits en médecine et en physiologie. — C'est le plus souvent aux appareils d'induction que l'on a recours lorsque l'on veut produire des variations brusques; ces appareils sont d'un emploi commode et l'on comprend qu'ils soient avantageux à ce point de vue, dans la pratique. Mais leur emploi n'est pas sans présenter quelques inconvénients : il faut mettre en première ligne la difficulté, l'impossibilité même de faire des mesures, de déterminer numériquement la valeur des actions que l'on produit; puis, d'autre part, les effets d'induction correspondent à chaque instant à de fortes différences de potentiel et à de très faibles quantités d'électricité mise en mouvement, conditions très différentes de celles qui se présentent par l'emploi des piles. Il y a de plus une autre différence essentielle provenant de la faible durée des courants induits, faible durée qui peut être un inconvénient dans les expériences physiologiques ou dans les applications thérapeutiques dans lesquelles certaines actions peuvent ne pas se produire si la cause d'excitation est de trop faible durée.

Pour ces diverses raisons l'emploi des courants induits nous paraît fâcheux et, jusqu'à nouvel ordre, jusqu'à ce que l'on soit mieux renseigné sur l'influence des éléments qui caractérisent les courants et sur les moyens de mesure dans les courants induits, il nous semblerait préférable de se borner à l'usage des courants

1. M. Boudet de Pâris pense que l'effet produit dépend de l'énergie du courant, qu'il évalue en travail mécanique : nous avons dit que nous étions disposé à admettre cette opinion.

Dans cette hypothèse, le travail correspondant à un courant d'intensité i, évaluée en milliampères, pour une différence de potentiel ε entre les points d'entrée et de sortie du courant agissant pendant un temps t évalué en secondes est :

$$W = \frac{I\varepsilon t}{0{,}00000981}$$

W étant évalué en milligrammètres.

A cause de la grande résistance des tissus comparée à celle de la pile, on peut sans grande erreur remplace ε par E force électromotrice.

Dans le cas où l'on emploie un condensateur de capacité C on a :

$$W = \frac{1}{2} E^2 C \frac{1}{9{,}81}$$

C étant évalué en microfarad.

interrompus en ayant soin de préciser tant les données du courant même que celles qui caractérisent les interruptions.

Pour l'application des courants induits on se sert souvent d'électrodes identiques à celles qui servent pour les courants continus; mais on emploie souvent aussi des conducteurs terminés par des sphères ou des olives métalliques de petites dimensions qui permettent de limiter plus spécialement l'action à un point déterminé; quelquefois enfin on remplace ces électrodes par de petits balais métalliques que l'on promène à la surface de la peau.

722. — Les courants induits ne présentent pas toujours les mêmes propriétés et il conviendrait dans chaque cas de choisir le courant d'après les effets que l'on veut obtenir. Il existe une différence essentielle suivant que le fil de la bobine induite est fin et long, ou qu'il est gros et court.

La force électromotrice d'une bobine induite, pour un même courant inducteur et une même nature d'interruption, croît avec la longueur plus rapidement que l'intensité; quant à l'énergie elle croît plus vite encore [1]. Les actions qui ne dépendent que de la quantité d'électricité mise en jeu seront d'autant plus fortes que le fil induit sera plus long; mais en même temps croîtront plus rapidement les effets qui dépendent de la différence de potentiel et de l'énergie dépensée. Suivant donc que l'on voudra ou non développer ces derniers effets il faudra prendre un fil long ou un fil court.

La section du fil induit n'intervient pas directement dans la mesure de l'intensité; mais elle joue cependant un rôle efficace en ce qu'elle détermine en réalité la distance à la bobine inductrice des couches successives des spires induites si bien qu'il y a intérêt au point de vue de l'intensité à prendre des fils fins. La force électromotrice et l'énergie varient en raison inverse de la section, de telle sorte que, en ce qui concerne ces éléments, il y a, à plus forte raison, intérêt à prendre des fils fins [1]. Mais il faut remarquer

1. Reprenons en la développant un peu une formule donnée précédemment (350, note). Si q est la quantité d'électricité, mise en jeu par l'électricité d'un courant induit d'intensité I qui commence ou qui finit, si l est la longueur du fil induit, on a, K étant un coefficient dépendant de l'appareil $q = \mathrm{K}Il$; on a également $q = it$, i étant l'intensité moyenne du courant induit et t sa durée : on déduit de là :

$$i = \frac{\mathrm{K}Il}{t}.$$

Si e est la face électromotrice correspondante, r la résistance du fil induit on a $e = ir$

d'autre part que la diminution de section produit une augmentation de résistance et par suite fait croître la quantité de chaleur dégagée. Aussi convient-il de ne pas donner un trop faible diamètre au fil induit.

Dans le cas des machines magnéto-électriques, il faut faire intervenir la rapidité de la rotation, tous les éléments du courant croissant en même temps que la vitesse.

Les extra-courants, étant produits par des fils gros et courts relativement, sont donc caractérisés parce que l'énergie et la force électromotrice ne sont pas grandes par rapport à l'intensité du courant produit.

Ces diverses indications permettent de faire un choix parmi les courants d'induction lorsque l'on sait, ce qui n'est pas malheureusement le cas général, de quel élément dépend l'effet que l'on veut obtenir.

723. Appareils d'induction spéciaux. — Les appareils d'induction employés en physiologie ou en médecine sont de formes différentes suivant les usages auxquels on les destine, notamment suivant qu'ils doivent être facilement transportables ou non.

Occupons-nous d'abord des appareils de laboratoire pour lesquels le poids et les dimensions sont de peu d'importance. Dans un grand nombre de cas, trop fréquents malheureusement peut-on dire, on cherche à obtenir des effets d'induction sans chercher à les évaluer même d'une manière approchée; on peut alors faire usage d'une machine d'induction quelconque. La bobine de Ruhmkorff est commode, mais on n'a aucune idée de ce que l'on obtient; la machine de Clarke serait préférable d'abord parce que l'on peut faire varier les effets dans un sens connu en employant les bobines à fil fin ou les bobines à gros fil, puis parce que l'on peut agir en faisant varier la vitesse de rotation; il est vrai que, alors, on produit un double effet, les courants deviennent plus faibles lorsque la vitesse de rotation diminue et de plus les changements de sens ou les variations d'intensité deviennent moins nombreuses dans un même temps.

et comme $r = \frac{\rho l}{s}$, ρ étant la résistance du spécifique du fil et s sa section, il vient immédiatement :

$$e = \frac{\mathrm{K} l^2 \rho}{t.s} \quad \text{et} \quad ei = \frac{\mathrm{K}^2 \mathrm{I}^2 l^3 \rho}{t^2 s}$$

Ces formules bien entendu ne sont pas complètes car elles supposent implicitement que tous les points du circuit sont à la même distance du circuit inducteur, ce qui n'est pas.

Il n'existe jusqu'à présent aucun appareil permettant de mesurer exactement les courants induits en donnant les divers éléments qui les caractérisent ; il n'est même pas possible de reproduire dans des expériences différentes exactement les mêmes effets ; on peut cependant obtenir approximativement cette condition.

On ne se sert guère dans les laboratoires que d'appareils voltaïfaradiques, de bobines d'induction. Il est alors deux éléments principaux sur lesquels il faut pouvoir agir : le nombre des interruptions du courant inducteur pour un temps donné et l'intensité du courant induit pour un nombre donné d'interruptions ; ce sont là deux questions complètement différentes et indépendantes.

724. — L'interrupteur Foucault et les trembleurs à ressort plus

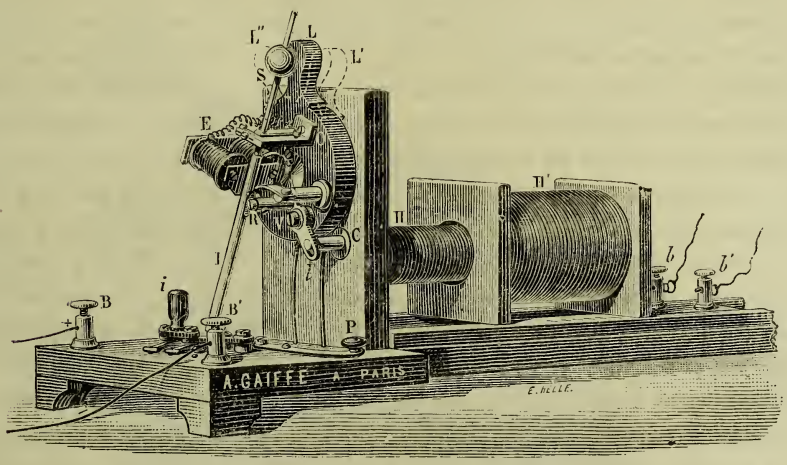


Fig. 574. — Interrupteur pour bobine d'induction. (*Gaiffe.*)

ou moins modifiés dans leurs dispositions matérielles sont fréquemment employés ; on peut aussi employer un électro-diapason ; tous ces interrupteurs sont sous la dépendance du courant inducteur. Il en est de même de l'interrupteur de Gaiffe (fig. 574) qui consiste en un pendule composé IL mobile autour d'un axe horizontal entre un ressort R et un électro-aimant E ; comme dans les trembleurs, le courant passe par l'axe de rotation, par le pendule et par le ressort avant de se rendre à l'électro-aimant et à la bobine inductrice ; lorsque le pendule oscille, chaque fois qu'il vient buter contre le ressort, il ferme le circuit et est attiré par l'électro-aimant dont il se rapproche, l'attraction cesse puisque le circuit est ouvert et le pendule retombe par son propre poids, l'action continue donc ; à

chaque oscillation le courant passe, puis est interrompu dans la bobine inductrice. Ce qui caractérise ce trembleur c'est que le système tout entier est monté sur une pièce en ébonite V à laquelle on peut donner diverses positions ; suivant la position, le pendule passe à la verticale à chaque oscillation ou est arrêté dans sa course par le ressort avant cette position, il en résulte que l'on fait varier aussi à volonté la durée de l'oscillation au moins dans une certaine mesure.

725. — Dans quelques cas, les interruptions du courant inducteur sont obtenues directement et ne dépendent pas du courant ; c'est le cas où, par exemple, on intercale sur le circuit inducteur une roue à interruptions de Masson que l'on fait tourner soit à la main, soit à l'aide d'un moteur quelconque. On peut également faire usage d'un métronome, pendule composé dont le mouvement est entretenu par un rouage d'horlogerie et dont on fait varier la durée des oscillations en déplaçant un curseur sur une tige graduée. On adapte à l'axe un fil métallique recourbé dont la pointe vient à chaque instant plonger dans un godet de mercure ; si alors le fil qui vient de la pile aboutit à ce mercure d'une part, tandis que le fil qui va à la bobine inductrice est en relation avec l'axe de rotation on voit que le circuit sera fermé pendant tout le temps que le fil sera plongé dans le mercure et sera ouvert quand le fil sera hors du mercure ; naturellement, comme dans l'interrupteur de Foucault, il sera bon de recouvrir le mercure d'une couche d'alcool. On fera varier la rapidité des interruptions en déplaçant le curseur de manière à changer la durée des oscillations ; on agira sur la durée du passage du courant induit en changeant la position du niveau du mercure par rapport à la pointe métallique, le circuit restant fermé d'autant plus longtemps que ce niveau sera plus élevé, et inversement.

726. — Dans ces diverses dispositions, on peut bien faire varier à volonté la fréquence des interruptions ; mais on change aussi, par là même, la durée du passage du courant et cela suivant une loi difficile à préciser. Dans le cas du métronome même, bien qu'on puisse agir séparément sur chaque élément, on ne peut obtenir des durées de courant réellement égales lorsque l'on change la fréquence. On conçoit cependant que dans certaines recherches de physiologie, il y aurait intérêt à ne faire varier que l'un de ces éléments. C'est pour répondre à cette condition que MM. Trouvé et Onimus ont imaginé l'appareil régulateur des intermittences (fig. 575), appareil que l'on intercale dans le circuit inducteur ; il se compose d'un cylindre E mû par un mouvement d'horlogerie dont la vitesse peut

être maintenue constante à l'aide d'un régulateur à ailettes J, J′; ce régulateur peut d'ailleurs varier de manière à donner des vitesses différentes 1, 2, 3, 4, 5 tours par seconde.

Le cylindre présente vingt circonférences tracées à égales distances sur sa surface. Sur la première se trouve 1 cheville; il y en a 2 également espacées, sur la seconde circonférence, 3 sur la troisième, 4 sur la quatrième, 20 sur la vingtième, ces chevilles étant régulièrement distribuées sur chaque circonférence. Un stylet F mobile parallèlement à l'axe du cylindre peut se placer au-dessus de chacune des circonférences; il porte à la partie inférieure une came qui s'appuie sur le cylindre sous l'influence d'un ressort;

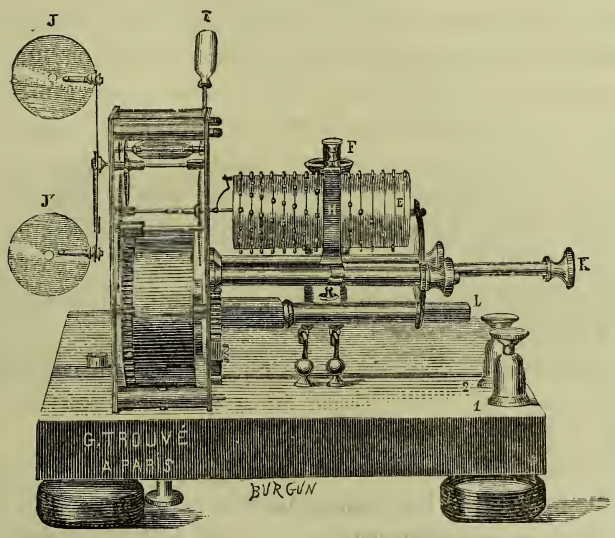


Fig. 575. — Interrupteur Trouvé et Onimus.

lorsque le cylindre tourne, la came soulève le stylet chaque fois qu'elle est rencontrée par une des chevilles ; le nombre des mouvements pour un tour du cylindre sera donc égal au nombre des chevilles qui se trouve sur la circonférence au-dessous de laquelle se trouve le stylet. Il est bien évident que, *pour une même vitesse de rotation* du cylindre la durée du mouvement du stylet reste la même qu'il soit soulevé 1, 2, 3, ou 20 fois par tour du cylindre (il n'en serait pas de même si l'on venait à changer la vitesse de rotation du cylindre).

Il est facile de comprendre comment on peut obtenir des interruptions de durée constante à l'aide de cet appareil, ou au contraire

des passages de courant ayant une durée invariable. Pour cela le stylet communique par son axe avec l'un des pôles de la pile; d'autre part son extrémité libre repose sur une pièce métallique et touche, lorsqu'elle est soulevée, une autre pièce également métallique. Supposons que la pièce inférieure soit mise en communication avec la bobine inductrice; le stylet touchera cette pointe et le courant passera, excepté aux instants où la came sera soulevée par une cheville; il y aura interruption du courant pendant le passage de la cheville et ces interruptions, quel qu'en soit le nombre, auront la même durée si l'on ne change pas la vitesse du cylindre.

Supposons au contraire que ce soit la pièce supérieure qui ait été mise en communication avec la bobine inductrice; alors le courant ne passera pas lorsque le stylet sera en repos, et il s'établira seulement pendant le temps que la came étant soulevés par une cheville la pointe du stylet viendra toucher la pièce supérieure. Pour les mêmes raisons que précédemment, et dans les mêmes conditions, les durées de passage du courant seront donc bien égales.

On pourra donc avoir des interruptions ou des passages de courant d'égale durée et dont le nombre pour un même temps variera suivant la série 1, 2, 3,.... 20. Mais on ne pourra dépasser ce dernier rapport sans modifier cette durée parce qu'il faudrait changer la vitesse de rotation du cylindre.

Il est clair que s'il était nécessaire d'obtenir d'autres rapports, il suffirait d'employer un cylindre sur lequel les chevilles seraient distribuées suivant une autre loi.

727. Réglage des courants induits. — L'intensité du courant induit, pour une même loi de variation du courant inducteur (c'est-à-dire pour un même interrupteur), dépend de divers autres éléments que l'on peut faire varier à volonté.

On peut évidemment d'abord agir sur l'intensité du courant inducteur, soit en prenant un plus ou moins grand nombre d'éléments, soit en faisant varier la résistance du circuit par un des procédés que nous avons déjà indiqués.

Mais il y a un autre procédé qui a été employé dans l'appareil connu sous le nom de *chariot* de *Du Bois-Reymond*, il consiste à faire varier la distance entre la bobine inductrice et la bobine induite, l'action diminue évidemment lorsque la distance augmente.

L'appareil est constitué par un banc en bois C (fig. 576) présentant une rainure longitudinale parallèlement à laquelle se trouve une règle graduée; à une extrémité s'élève une planchette verticale en bois supportant à une certaine hauteur la bobine inductrice H

maintenue horizontalement par une de ses extrémités et parallèle à la rainure, sur la face opposée de cette planchette se trouve en général l'interrupteur L qui peut être d'un modèle quelconque.

Un chariot en bois, qui pénètre dans la rainure, y glisse et peut s'arrêter en un point quelconque, supporte la bobine induite H dont l'axe est parallèle à la rainure et qui est creusée cylindriquement à sa partie centrale. Elle est à une hauteur telle que lorsque le chariot est poussé à fond de course la bobine inductrice pénètre précisément dans l'ouverture centrale de la bobine induite qui la recouvre entièrement; les extrémités des fils de la bobine induite aboutissent à deux bornes où se fixeront les fils qui serviront d'électrodes.

Il est facile de concevoir que l'action inductrice sera la plus considérable possible lorsque la bobine induite sera à fond de course et qu'elle diminuera au fur et à mesure qu'elle s'éloignera

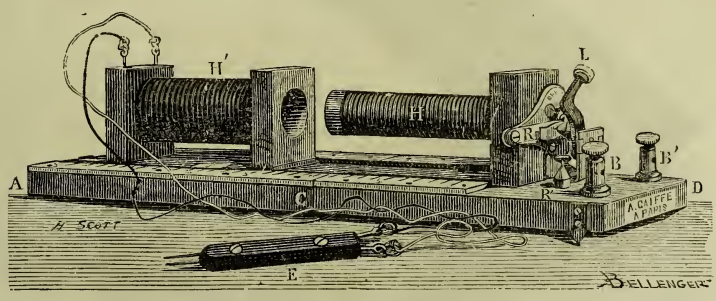


Fig. 576. — Bobine à chariot de Du Bois-Reymond. (*Gaiffe.*)

de cette position.. L'indication de la distance qui sépare les deux bobines précisera, pour un courant inducteur et un mode d'interruption donnés, les courants induits produits.

L'action inductrice se produit à grande distance, aussi faut-il que le banc et la règle graduée aient une grande longueur. A une distance de $1^m,50$, dans les appareils du modèle ordinaire, et avec un courant inducteur produit par 2 Bunsen, on entend un bruit très distinct dans un téléphone placé dans le circuit de la bobine induite.

Enfin, comme nous l'avons dit, les dimensions du fil de la bobine induite exercent une influence, aussi a-t-on généralement trois chariots différents portant des bobines de même diamètre mais recouvertes respectivement de fils gros, moyen et fin et dont les longueurs sont respectivement aussi faibles, moyenne et grande. On emploie chaque bobine suivant les résultats à atteindre, en se rappelant que

la différence de potentiel obtenue croît avec le nombre des spires et que la quantité d'électricité augmente quand la résistance du fil diminue.

728. Machines d'induction transportables. — On a adopté des dispositions assez variées pour les appareils d'induction destinés à être facilement transportés : nous décrirons quelques-uns des types qui sont actuellement le plus usités en commençant par les appareils volta-faradiques.

Appareil de M. Gaiffe. — Le modèle de M. Gaiffe, qui rappelle

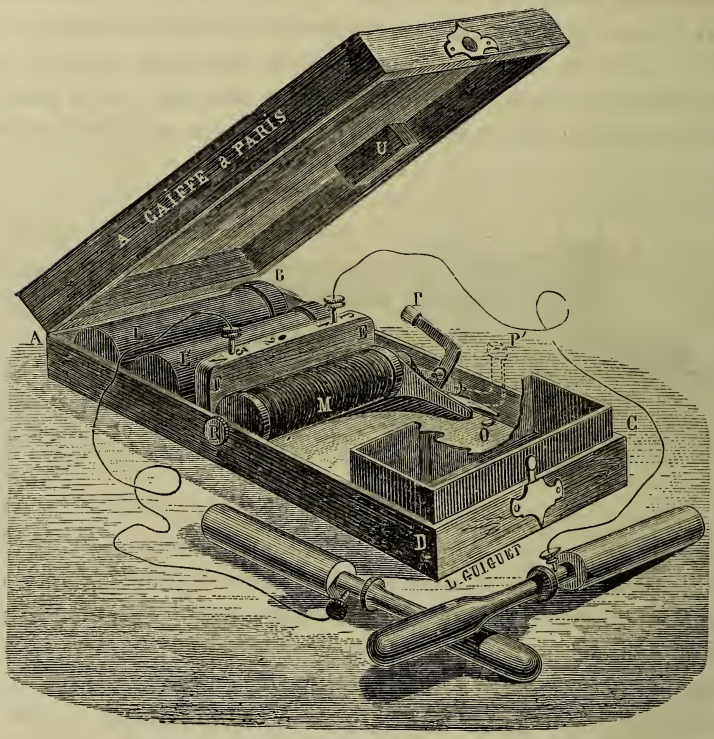


Fig. 577. — Appareil d'induction de poche. (*Gaiffe.*)

une disposition primitivement adoptée par Ruhmkorff, se compose d'une boîte de petites dimensions (fig. 577) comprenant trois compartiments. Le premier renferme la pile L, qui est formée de deux éléments au sulfate de mercure (328) ou au chlorure d'argent (325) ; dans le second se trouve la bobine d'induction M en face de laquelle se trouve l'interrupteur à ressort P dont on peut faire varier entre certaines limites la rapidité des vibrations; les communica-

tions entre la pile et la bobine sont fixes et s'établissent naturellement lorsque l'on met les éléments en place. Le troisième compartiment contient des électrodes de formes diverses que l'on applique suivant les cas et des conducteurs souples.

On règle la fréquence des courants en agissant sur l'interrupteur; d'autre part on peut faire varier l'intensité par l'emploi du *graduateur;* cet organe est composé d'un cylindre creux de laiton B interposé entre la bobine et le fer doux. Les courants induits qui se produisent dans cette enveloppe métallique diminuent d'une manière notable la production des courants induits; on augmentera donc l'action de ceux-ci en sortant le graduateur, et inversement.

Des bornes dans lesquelles on fixe les extrémités des conducteurs qui aboutissent aux électrodes permettent de recueillir à volonté les courants induits seuls, les extra-courants seuls, ou enfin les courants induits et les extra-courants réunis.

729. Machine magnéto-électrique de Page. — Cette machine, dont un modèle spécial aux applications médicales a été construit par Breton, est formée d'un aimant en fer à cheval devant les pôles duquel tourne une traverse de fer doux : autour des pôles est enroulé un fil constituant deux bobines réunies l'une à l'autre. Le déplacement du fer doux produit des variations dans le champ magnétique par suite de la réaction sur l'aimant, d'où résultent des courants induits dans le circuit des bobines. Les actions simultanées sur les deux bobines sont de sens contraire, aussi faut-il, pour que les actions soient concordantes, que les fils aient des enroulements inverses. La période qui ramène l'appareil à deux positions identiques est d'un demi-tour seulement de la traverse pendant lequel il y a deux changements de sens du courant; il y aura donc quatre changements de sens pour un tour complet de la traverse. Si donc on veut avoir des courants redressés, il faut disposer un commutateur spécial.

Le réglage dans ces machines se fait d'une part en modifiant la vitesse de rotation, ce qui change le nombre des interruptions en même temps que l'intensité, et d'autre part en faisant varier la distance du fer doux à l'aimant, ce qui modifie seulement l'intensité.

730. Machine magnéto-électrique de M. Gaiffe. — Dans ce modèle (fig. 578), M. Gaiffe a réuni les principes des machines de Clarke et de Page; il y a des bobines tournant devant un aimant, bobines contenant un noyau de fer doux, et des bobines entourant les régions polaires de l'aimant permanent; on réunit les courants produits dans ces deux paires de bobines à l'aide d'un commutateur

qui doit présenter une disposition particulière puisque, pour une révolution complète, le courant change quatre fois de sens dans les bobines fixes et deux fois seulement dans les bobines mobiles.

Le réglage de l'intensité du courant pour une même vitesse de rotation est obtenue en approchant ou éloignant, à l'aide d'une vis, l'aimant de l'armature mobile.

731. — Dans les appareils que nous venons de décrire ou de signaler, on ignore, comme nous l'avons dit le mode d'action de l'électricité et on ne peut avec certitude, rapporter les effets observés aux phénomènes mécaniques, thermiques ou chimiques; comme nous l'avons dit aussi nous sommes porté à penser que ce sont ces

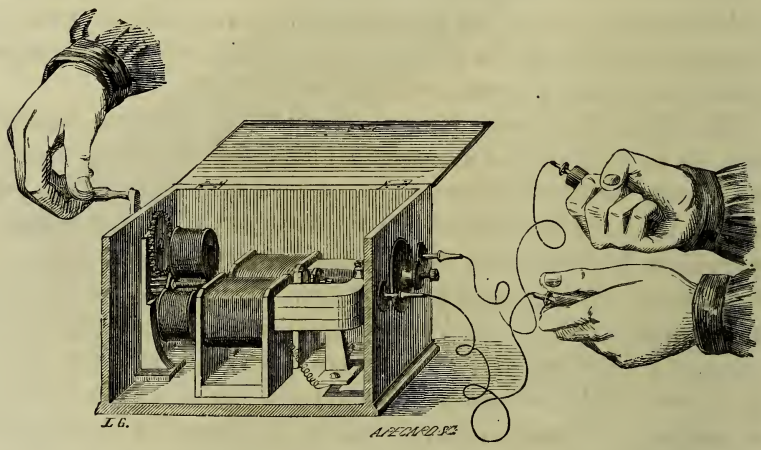


Fig. 578. — Machine magnéto-électrique. (*Gaiffe.*)

derniers qui interviennent et nous ne croyons pas que l'électricité ait une action physiologique spéciale.

Mais il y a un certain nombre de cas dans lesquels les effets qui sont utilisés, comme moyens thérapeutiques par exemple, sont d'une nature bien déterminée, thermiques ou chimiques. Nous allons en donner des exemples.

732. Du galvanocautère. — Dans un certain nombre de cas que ce n'est pas ici le lieu de déterminer, les chirurgiens emploient des pièces métalliques portées à l'incandescence : c'est là ce qui constitue le *cautère* ou, en précisant, le *cautère actuel.* Quels que soient les avantages de ce procédé, son emploi était très limité à cause des conditions mêmes dans lesquelles il était utilisé : la pièce métallique était chauffée à la température voulue et appliquée au point

indiqué ; mais on conçoit que le refroidissement ne tardait pas à se manifester ; pour éviter qu'il ne fût trop rapide, il fallait donner au cautère une masse assez considérable, ce qui le rendait peu aisé à manier sans s'opposer absolument à ce refroidissement. Il était évident que le cautère serait susceptible de très nombreuses applications si l'on parvenait à obtenir qu'une masse métallique de formes et de dimensions quelconques pût être maintenue à une température déterminée, cette température pouvant varier suivant les circonstances. Deux solutions ont été données de ce problème et ont rendu

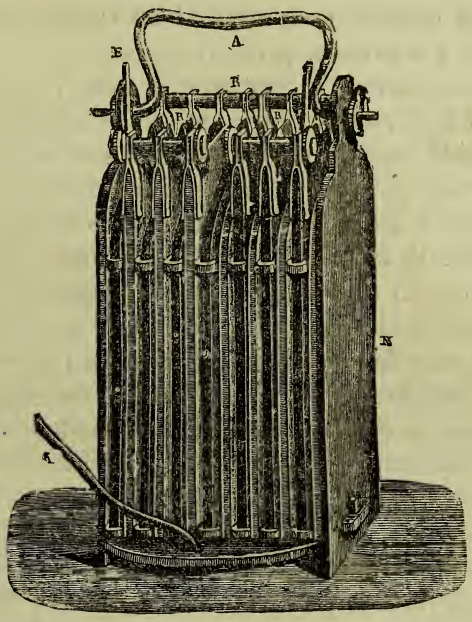


Fig. 579. — Pile à galvanocautère. (*Trouvé.*)

de grands services : l'une est le thermocautère de Paquelin dont nous n'avons pas à parler ici, l'autre est le *galvanocautère* dont l'emploi a été signalé pour la première fois par Heider, à Vienne (1845).

733. — Le galvanocautère repose sur l'échauffement que subit un fil de platine traversé par un courant : il comprend donc essentiellement deux parties ; l'appareil producteur du courant et le cautère proprement dit.

L'appareil producteur de courant peut être quelconque : jusqu'à présent on a employé seulement les piles et les accumulateurs.

M. Trouvé emploie une pile au bichromate de potasse : le liquide

est placé dans un vase de dimensions assez grandes de manière à diminuer la polarisation. Il y a 10 zincs et 10 charbons groupés de manière à faire deux éléments à grande surface (fig. 579); ces plaques sont placées à côté les unes des autres, séparées par des jarretières de caoutchouc que l'on place en haut et en bas des charbons; elles sont toutes maintenues dans un cadre rigide en ébonite présentant une poignée A à la partie supérieure, de telle sorte que l'on peut aisément plonger les couples ensemble dans le liquide excitateur, l'en sortir plus ou moins complètement, le plonger dans l'eau, etc.

Les fils qui conduisent le courant au cautère sont fixés à des bornes placées à la partie supérieure du cadre.

Pour régler le courant et, par suite, la température à laquelle est porté le fil, il faut pouvoir faire varier l'intensité du courant : le meilleur procédé consiste dans l'introduction dans le circuit d'un rhéostat de forme quelconque. On se dispense souvent de cet appareil et l'on règle l'intensité en enfonçant plus ou moins les couples dans le liquide. On fait ainsi varier la résistance de la pile et par suite celle du circuit tout entier dans des proportions très grandes.

Dans quelques anciens modèles, M. Trouvé avait adapté au cadre en ébonite un tube de caoutchouc par lequel on pouvait insuffler de l'air dans le liquide d'après les indications de Grenet; mais cette disposition paraît avoir été généralement abandonnée, elle exigeait l'emploi d'un aide supplémentaire, ce qui était un inconvénient.

Bien que tous les modèles de piles puissent convenir, c'est presque exclusivement la pile au bichromate qui a été employée; dans le modèle de M. Chardin, la pile est tout entière renfermée dans une boîte; le liquide est contenu dans deux auges en verre, les zincs et les charbons, groupés toujours de manière à constituer deux éléments de grande surface, sont fixés à la face inférieure d'une planchette que l'on peut faire monter ou descendre à l'aide d'une vis, le mouvement étant guidé par des tiges métalliques latérales. La boîte s'ouvre sur le côté pour pouvoir enlever les auges, mettre ou jeter le liquide, le remplacer par de l'eau pour le lavage des plaques, etc.

734. — Dans un autre modèle, M. Chardin a cherché à rendre la pile transportable alors qu'elle est prête à fonctionner. La boîte est alors plus large (fig. 580) et il existe, entre les plaques extrêmes de chaque élément F et les tigesqui guident le mouvement, deux espaces vides dans lesquels on place les auges L contenant le liquide; quand on abaisse la planchette supérieure, elle vient s'appliquer par

deux feuilles de caoutchouc qui sont fixées à sa face inférieure sur les bords de ces auges de manière à rendre la fermeture hermétique. Lorsqu'on veut faire fonctionner la pile, on lève la planchette, on place les auges sous les lames de zinc et de charbon, et on abaisse de nouveau la planchette d'une quantité plus ou moins considérable suivant que l'on veut obtenir un courant plus ou moins intense. On fait la manœuvre inverse lorsque l'on cesse de se servir de la pile; mais comme alors les plaques entraînent un peu de liquide qui corroderait la boîte, on place au-dessous de chaque élément une petite auge vide en ébonite M.

Dans une autre disposition imaginée par M. Boisseau du Rocher, les zincs et les charbons sont fixes et placés dans des auges en porcelaine; celles-ci ont une forme particulière et présentent deux parties, le liquide est renfermé dans la partie inférieure, mais en y insufflant de l'air on peut le faire monter par pression dans la cavité supérieure où il vient baigner les zincs et les charbons, s'élevant plus ou moins suivant la quantité d'air insufflée. Il suffit de laisser échapper l'air pour que le liquide retombe dans la cavité inférieure par son propre poids.

735. — Il n'est pas difficile d'imaginer d'autres dispositions qui pourraient être adoptées pour répondre à des besoins divers.

Nous n'insisterons pas et nous dirons seulement que nous avons mesuré la force électromotrice et l'intensité du courant qui, dans une expérience donnée, amenaient un cautère à l'incandescence convenable :

La force électromotrice de la pile était de $3^{\text{volts}},6$ environ, sa résistance de $0^{\text{ohm}},1$, l'intensité du courant de 20 ampères et la résistance du cautère de $0^{\text{ohm}},08$.

Il est évident que l'on peut sans difficulté remplacer la pile par un accumulateur : il existe plusieurs modèles qui présentent cette disposition. Comme on ne peut, dans ce cas, faire varier la résistance de la pile ni le nombre des éléments, il faut nécessairement joindre un rhéostat à l'appareil pour régler l'intensité du courant.

On charge l'accumulateur avec une pile quelconque qui peut être peu puissante; pour éviter les inconvénients que présente l'emploi des piles à liquides, M. Chéron a proposé de charger l'accumulateur à l'aide d'une pile thermo-électrique.

736. — Le cautère proprement dit comprend un manche sur lequel on fixe à volonté les pièces métalliques de formes variées suivant les circonstances.

Le manche (fig. 581) est formé par une substance isolante, de

l'ébonite ou du bois le plus souvent, qui est traversée de part en part dans le sens de sa longueur par deux conducteurs métalliques; à une extrémité se fixent les fils qui viennent de la pile, à l'autre on fixe par des vis les extrémités du conducteur métallique qui constitue le cautère.

L'un des conducteurs qui traversent le manche est sectionné obliquement vers sa partie médiane et, par suite de l'élasticité, les deux portions tendent à se séparer, le courant est alors interrompu; pour le rétablir il suffit d'appuyer sur une pièce en ivoire B située latéralement et qui met en contact les deux parties coupées.

De plus, un mouvement de verrou permet de maintenir ce con-

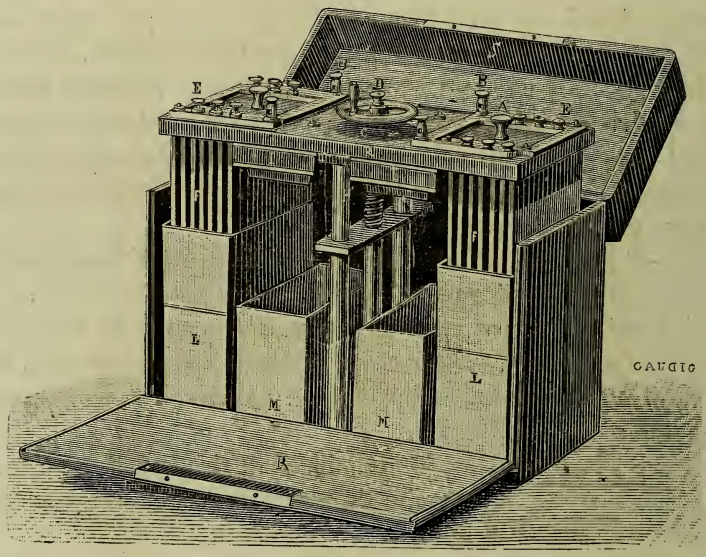


Fig. 580. — Pile à galvanocautère. (*Chardin.*)

tact sans qu'il soit nécessaire de continuer à appuyer; un mouvement du verrou en sens contraire rend libre le conducteur intérieur et interrompt le courant.

Primitivement on a cherché à donner au galvanocautère des formes qui rappelaient les cautères autrefois en usage; et comme on ne peut amener à l'incandescence une masse de platine ayant des dimensions un peu grande, on enroulait un fil de platine fin ($0^{mm},5$ de diamètre environ) sur un support de porcelaine ayant la forme du cautère; c'est ainsi que l'on obtenait, par exemple, le cautère en olive.

Mais on reconnut bientôt que le galvanocautère pouvait être utilisé sous de nombreuses autres formes d'une manière au moins aussi avantageuse; on eut alors des cautères propres à faire des pointes de feu, à pénétrer au besoin dans les tumeurs, cautère formé par un fil recourbé de manière à présenter deux parties parallèles très voisines et un sommet à angle plus ou moins aigu (fig. 581). On emploie aussi très fréquemment le couteau galvanique ou cautère

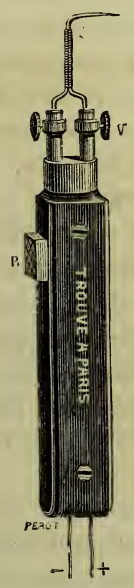


Fig. 581.

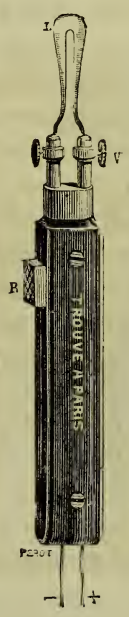


Fig. 582.

Fig. 583.

cultellaire formé par une lame assez mince, résistante cependant et recourbée dans le plan de sa partie élargie (fig. 582). Ce couteau sert dans un grand nombre de cas; amené à une température convenable, le rouge sombre, qui correspond à 700 ou 800° environ, il produit l'hémostase; à une température plus basse, il n'entamerait pas les tissus assez aisément, à une température plus élevée, il pourrait amener des hémorrhagies.

737. — Le galvanocautère rend également de grands services sous la forme d'anse galvanique : l'anse galvanique (fig. 583) comprend comme les cautères précédents un manche A avec poignée permettant de faire passer ou d'interrompre le courant. Un fil de platine assez fin pour être souple, assez résistant cependant, passe dans deux guides à l'extrémité d'une tige d'ivoire F fixée sur le prolongement du manche de manière à former au delà une boucle, une anse G; par ses extrémités il est fixé à un treuil que l'on peut faire mouvoir à l'aide d'un bouton E de manière à rétrécir à volonté la boucle.

Les guides placées à l'extrémité de la tige d'ivoire F communiquent par des pièces métalliques fixées sur cette tige avec les conducteurs situés dans le manche, de telle sorte que lorsque le circuit est fermé l'anse est traversée par le courant et peut ainsi être amenée à l'incandescence. On conçoit aisément alors que, si l'on a embrassé le pédicule d'une tumeur avec l'anse, en faisant passer le courant et agissant sur le treuil, on arrivera à sectionner le pédicule.

738. Actions thermiques au contact des électrodes : galvanopuncture ou électrolyse. — Indépendamment des modifications chimiques que le courant doit nécessairement amener dans l'intimité des organes qu'il traverse, il agit aussi chimiquement aux points d'entrée et de sortie dans le corps, aux points d'application des électrodes. Cette action peut être assez minime pour passer presque inaperçue, elle doit même être telle si elle n'est pas le but que l'on se propose d'atteindre; elle peut, au contraire, être très notable.

Pour diminuer l'action chimique superficielle, qui est faible d'ailleurs tant que le courant ne dépasse pas 30 milliampères, il faut augmenter la surface des électrodes en employant de larges plaques, des feuilles d'amadou imbibées d'eau salée, ou, comme l'a proposé M. Apostoli, de la terre glaise rendue humide par une dissolution saline.

Si le courant présente une intensité suffisante et que les électrodes soient de faibles dimensions, on obtient une action chimique modérée qui est capable de produire la rubéfaction ou même la vésication. M. le Dr Boudet de Pâris a proposé d'appliquer ce procédé dans les cas où l'on cherche à obtenir ces résultats; mais, comme il est inutile dans ce cas de faire traverser tout ou partie de l'organisme par le courant; il a disposé un excitateur spécial. Cet excitateur (fig. 584) se compose de deux pièces circulaires métalliques placées concentriquement; elles sont isolées l'une de l'autre

et portées par un manche en métal; chacune d'elles communique par un fil métallique avec un des pôles de la pile; le courant passe donc par la peau et les parties superficielles de l'une de ces plaques à l'autre, en général, de l'anneau extérieur à la plaque intérieure. On règle l'action en faisant varier soit l'intensité du courant, soit la durée de son passage.

Contrairement à l'opinion de M. Boudet de Pâris, nous ne croyons pas qu'il y ait là une action thermique, mais une action chimique. Dans l'action d'un courant sur des tissus animaux, il y a décomposition des diverses parties constitutives et notamment des sels qui s'y trouvent compris, sels parmi lesquels existent en certaine proportion des sels alcalins à acides organiques. Il se passe, dans ce cas,

Fig. 584. — Excitateur concentrique.

ce qui se produit dans l'électrolyse en général, le métal se portant au pôle négatif et le radical acide au pôle positif; mais ces éléments, au contact de l'eau, produisent des actions secondaires donnant des bases alcalines d'une part et des acides de l'autre; nous pensons que ce sont ces substances qui agissant chimiquement produisent les effets que nous venons de signaler.

739. — C'est d'ailleurs certainement à ces actions chimiques qu'il faut attribuer les effets observés au contact des électrodes lorsque le courant est plus énergique ou agit plus longtemps; il y a alors une action caustique incontestable qui se traduit par la formation de véritables eschares : au pôle négatif se forment des eschares molles, au pôle positif des eschares dures et rétractiles, les unes et

les autres analogues à celles qu'aurait produites directement l'action des alcalis ou celle des acides. Ajoutons que, au pôle positif, on observe également la coagulation de l'albumine, effet dû également à la présence des acides organiques.

Ces effets ont été appliqués en chirurgie et constituent la base de ce que l'on appelle la *galvanocaustique chimique* ou *électrolyse*, que l'on applique le plus souvent sous la forme particulière de *galvanopuncture*. On introduit dans les tissus au point où l'on veut agir des aiguilles en acier ou en fer doux; si elles doivent agir seulement profondément, comme c'est le cas pour les anévrysmes, elles sont garnies d'un vernis isolant excepté à leurs extrémités; dans ce cas, il convient qu'elles soient très fines et il faut employer des dispositions spéciales pour les enfoncer. Les têtes de ces aiguilles sont alors munies d'une pince où l'on attache le fil qui aboutit au pôle positif de la pile, tandis que le fil négatif est en communication avec une large électrode appliquée à quelque distance sur la peau du malade. On fait passer le courant, en prenant la précaution nécessaire de le faire croître progressivement et, de même, de ne le faire cesser que progressivement. Dans des opérations faites sur des anévrysmes, on a pu atteindre l'intensité de 50 milliampères et prolonger l'action pendant 10 minutes. Quand on fait usage de plusieurs aiguilles, on les met souvent en contact avec la pile successivement; quelquefois cependant on a établi le contact simultanément pour toutes.

Il semble hors de doute maintenant et contrairement à des opinions opposées qui ont été exprimées à diverses reprises que, dans le cas des anévrysmes, les aiguilles doivent être mises en contact avec le pôle positif toujours et non avec le pôle négatif ou alternativement avec les deux. C'est du reste en conformité avec ce que l'on sait de l'action des pôles sur le sang.

740. — Une autre application de l'action électrolytique des courants consiste dans le passage de substances médicamenteuses dans l'organisme sous l'influence des courants, non que, comme il a été avancé à tort, on puisse faire pénétrer ainsi des substances complexes quelconque, mais seulement quelques éléments simples; c'est ainsi que, en mettant en contact avec la peau (à l'aide d'un bain local, par exemple) une dissolution d'iodure de potassium, où plonge l'électrode négative d'une pile tandis que l'électrode positive est appliquée sur la peau, on peut, par suite d'une action électrolytique suivie d'absorption, faire pénétrer une petite quantité d'iode. Mais d'une part, l'iode n'est pas, comme il a été dit, transporté au pôle

positif, il se combine, dès son entrée sans doute, et son existence ne peut être décelée que par l'analyse des sécrétions qui peuvent en renfermer, l'urine, par exemple; d'autre part, la quantité qui pénètre ainsi est très petite (Lauret, 1885).

Il est possible cependant que cette méthode puisse être utilisée dans quelques cas exceptionnels d'intolérance de certains médicaments; mais il ne paraît pas douteux qu'elle n'ait pas la généralité qu'on a cru pouvoir lui attribuer.

741. — Emploi de l'électricité comme moyen de diagnostic. — Si les procédés électriques sont peu variés, en réalité, en thérapeutique, il n'en est pas de même de l'emploi de ces procédés comme méthode d'observation, de diagnostic. Nous ne pouvons qu'indiquer sommairement les applications principales qui ont été proposées, nous ne doutons pas d'ailleurs qu'elles ne se multiplient de plus en plus et cette considération devrait suffire pour que les médecins se tinssent au courant, au moins d'une manière générale, des progrès de l'électricité.

Un fil de platine (métal présentant une grande résistance au passage du courant, une très faible conductibilité) traversé par un courant assez intense est facilement amené à l'incandescence. La lumière qu'il produit serait d'un prix élevé et ne peut être employée à l'éclairage d'une manière pratique; elle a été utilisée par M. Trouvé qui dans le *polyscope* s'en est servi comme moyen d'éclairage des cavités en chirurgie; le fil de platine fin, porté par un manche isolant contenant deux conducteurs, comme le manche du galvanocautère, est placé devant un réflecteur émaillé de forme variable qui a le double avantage d'augmenter la quantité de lumière envoyée dans une direction donnée et d'empêcher le rayonnement et par suite l'échauffement dans les autres directions (fig. 585 et 586).

Le polyscope fonctionne à l'aide d'une pile ou d'un accumulateur; un rhéostat permet de varier l'intensité du courant et par suite la puissance d'éclairement.

Actuellement, M. Trouvé, emploie dans la construction du polyscope de petites lampes à incandescence pour remplacer le fil de platine.

742. — M. Trouvé a employé le même procédé pour éclairer et voir les cavités profondes : à l'intérieur d'une sonde, on introduit en face d'une fenêtre latérale un fil de platine *f* (fig. 587) amené à l'incandescence par le passage d'un courant; la lumière est renvoyée normalement à la sonde à travers la fenêtre par un prisme à réflexion totale et éclaire les parties voisines. La lumière émanée

de ces parties fait le même trajet en sens contraire. Une série de lentilles placées convenablement dans la sonde ou sur un prolongement permet d'avoir une image nette de la partie que l'on veut examiner.

Dans un nouveau modèle, M. Trouvé remplace le fil de platine par une petite lampe à incandescence placée dans un réservoir en verre

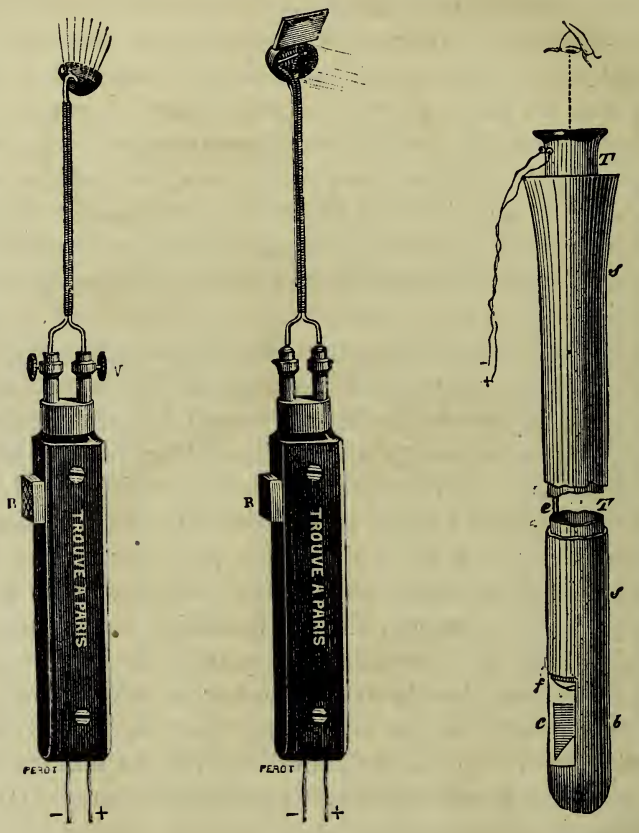


Fig. 585. Fig. 586. Fig. 587.

plein d'eau pour éviter l'échauffement : ce changement entraîne d'ailleurs quelques modifications de détails.

Reprenant la même idée, M. Boisseau du Rocher a construit un appareil qu'il appelle électromégaloscope et qui ne diffère de l'appareil précédent que par les dispositions optiques sur lesquelles il est sans intérêt d'insister ici.

Les lampes à incandescence ont été proposées et peuvent être

employées avec avantage pour obtenir un éclairement convenable dans nombre de circonstances; nous en avons déjà donné des exemples.

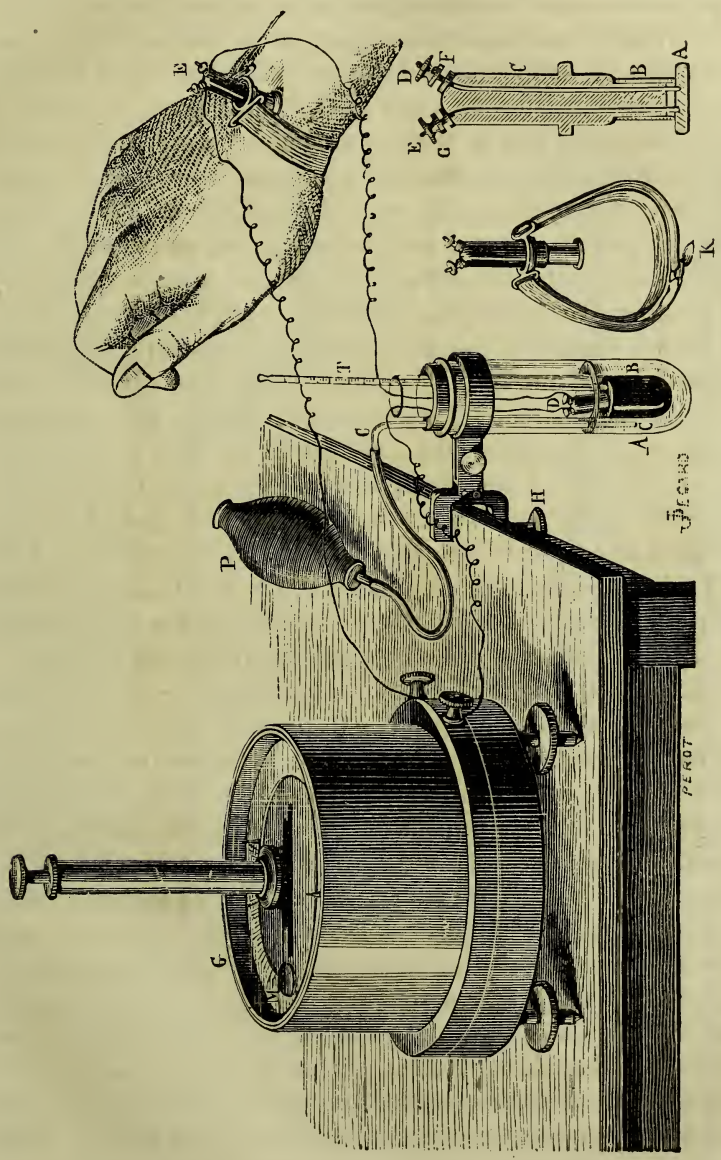


Fig. 588.

743. Mesures des températures. — Nous avons déjà décrit les aiguilles thermo-électriques qui permettent de comparer aisément

les températures de deux points déterminés, soit qu'il s'agisse, par exemple d'étudier ce qui se passe à ce point de vue chez un insecte vivant comparé à un insecte mort, soit que l'on cherche la différence qui existe entre la température d'un muscle qui travaille et celle d'un muscle qui ne travaille pas, ou la différence que l'on observe entre la température du sang artériel et celle du sang veineux. Nous n'insisterons donc pas, et nous nons bornerons à décrire le dispositif que M. Redard a combiné pour permettre de déterminer la température absolue en un point du corps (fig. 588).

M. Redard emploie deux éléments fer-maillechort d'une forme spéciale; ils sont entourés d'une chemise de fer de manière à ne présenter que ce métal à la périphérie. Ils sont montés en opposition et leur circuit comprend un galvanomètre G, auquel on a donné une forme très ramassée. L'un des éléments E est appliqué, maintenu sur la peau au point que l'on veut étudier; l'autre D est introduit dans un tube rempli de mercure plongé dans de l'esprit de bois où plonge également un thermomètre. On opère par la méthode de réduction au zéro; on cherche à amener et à maintenir au zéro l'aiguille du galvanomètre et on y arrive soit en chauffant l'esprit de bois avec une lampe à alcool, soit en le refroidissant par l'insufflation d'air froid à l'aide d'une poire de caoutchouc P. Lorsque l'aiguille du galvanomètre est au zéro, la température indiquée par le thermomètre est précisément celle du point où est appliqué le second élément.

744. Explorateur Trouvé; pince exploratrice. — L'explorateur Trouvé est destiné à reconnaître la nature d'un corps dur situé au fond d'une plaie et que ne permet pas de distinguer un sondage à l'aide d'une sonde ordinaire; il se compose (fig. 589) d'une sonde constituée par une matière isolante et dans laquelle passent deux fils métalliques qui, à l'extrémité libre, dépassent légèrement l'enveloppe et sont terminés par des pointes aiguës. A l'autre extrémité la sonde porte un petit trembleur à électro-aimant, tout à fait analogue à une sonnerie qui n'aurait pas de timbre; le mouvement du trembleur est visible car le système qui est de petites dimensions est compris entre deux lames de glace; il se produit d'ailleurs un bruit qui est suffisamment distinct, même à quelque distance; ce système est relié, par deux cordons souples renfermant une âme conductrice recouverte de soie, à une pile qui peut être de petites dimensions également et qui, fermée hermétiqnement, peut se porter en bandoulière.

A l'état de repos, le circuit n'est pas fermé, et, par suite, le trembleur ne fonctionne pas; lorsque l'on veut faire une exploration, on

introduit la sonde dans la plaie ou dans la fistule jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par le corps dur dont on veut connaître la nature ; s'il s'agit d'un os ou d'un fragment d'os, la substance osseuse même humide étant très peu conductrice, le courant ne s'établit pas; si, au contraire, la sonde a rencontré un fragment métallique, le métal établit la communication entre les deux pointes, le circuit est fermé

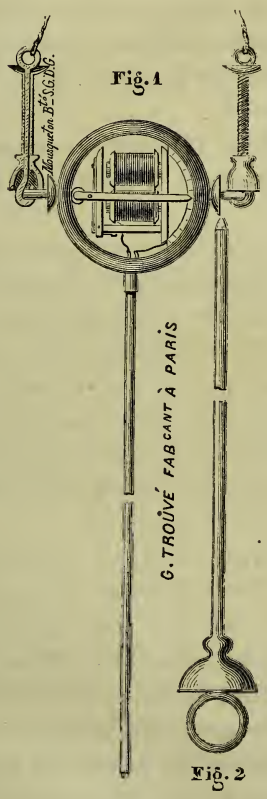


Fig. 589. — Explorateur Trouvé.

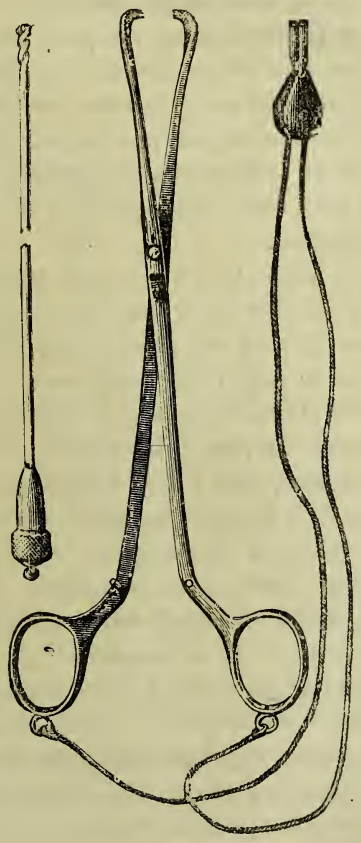


Fig. 590. — Pince exploratrice Trouvé.

et le trembleur entre en action. L'effet se produit même si un morceau d'étoffe recouvre le fragment métallique, comme il arrive souvent dans le cas de blessures par arme à feu, parce que les pointes des fils pénètrent à travers l'étoffe jusqu'au métal.

On peut aisément reconnaître si le fragment métallique est constitué par du plomb ou par un métal dur comme le fer ou le cuivre.

Dans le premier cas, les pointes ont pénétré d'une petite quantité dans le métal et un léger déplacement de la sonde ne fait pas cesser le contact, le courant continue de passer; dans le cas du cuivre ou du fer, il n'en est pas de même : le contact ne s'est établi que superficiellement et le moindre mouvement de la sonde le fait cesser pour une pointe ou pour les deux, le courant ne passe plus, le mouvement du trembleur s'arrête.

Quelquefois même, lorsque le fragment considéré n'a pas pénétré trop profondément, on peut distinguer le cuivre du fer en approchant une petite aiguille aimantée suspendue par un fil de coton, aiguille qui est influencée par le fer et non par le cuivre. Mais cette distinction ne peut pas toujours être effectuée.

Nous indiquerons en parlant de la bobine d'induction comment on peut être renseigné dans des cas analogues à ceux que nous signalons.

Le même trembleur peut être appliqué utilement aux pinces qui sont employées à faire l'extraction de fragments métalliques; les branches de ces pinces (fig. 590) sont isolées l'une de l'autre au pivot et sont reliées aux bornes du trembleur; lorsque les mors, généralement garnies de pointes, serrent le morceau de métal, le circuit est fermé, le trembleur fonctionne; il reste immobile, au contraire, tant que le fragment métallique n'est pas serré par les mors ou lorsque les mors sont fermés sur un os ou une partie osseuse non conductrice.

745. Étude de la sensibilité, de la contractilité. — Un élément important de diagnostic, surtout dans les affections du système nerveux, c'est la sensibilité générale; il n'est pas sans intérêt de l'étudier au point de vue des actions électriques. On promène à la surface du corps deux pointes mousses dont la distance a été fixée à l'avance et qui communiquent avec les bornes d'une machine d'induction et l'on cherche s'il est des points où l'on ne perçoit pas la sensation spéciale éprouvée sur les autres parties de la peau, des *points anesthésiques* pour l'action électrique. Il peut aussi y avoir d'ailleurs des points hyperesthésiques. On peut même obtenir une mesure de ces modifications en employant une bobine inductrice formée de deux fils traversés en sens contraire par des courants : l'induction sera nulle quand les courants seront égaux, elle croîtra avec la différence d'intensité; cette différence d'intensité mesurera donc la grandeur de l'action produite. Au lieu de mesurer les intensités, on peut, comme l'a fait M. Boudet de Pâris, établir les deux fils en dérivation sur une même pile et mesurer la grandeur de la résis-

tance qu'il faut introduire dans l'une des dérivations pour provoquer une sensation.

Il est utile également de mesurer le retard de la sensation : on opère alors à l'aide de la méthode d'enregistrement. On provoque une excitation et on inscrit sur le cylindre le moment où cette excitation s'est produite : le patient presse sur un bouton quand il perçoit la sensation, le bouton met en jeu un signal Marcel Deprez qui enregistre ainsi l'instant où la sensation a été perçue. La distance des deux tracés obtenus permet de mesurer le temps qui a séparé l'excitation de la sensation.

746. — L'étude de la contractilité se fait en cherchant quelle est

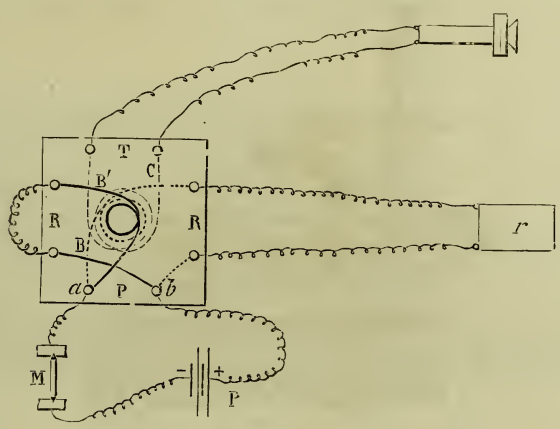


Fig. 591. — Pont différentiel du Dr Boudet de Pâris.

la plus faible étincelle ou le plus faible courant qui puisse provoquer la contraction d'un muscle déterminé.

On peut pour obtenir des mesures numériques employer la bobine d'induction à courants inducteurs différentiels que nous avons indiquée plus haut.

On peut également utiliser cet appareil pour l'étude spéciale de l'acuité de la sensation auditive ; le pont différentiel de M. Boudet de Pâris employé dans ce cas est une forme particulière de la balance d'induction. Une pile P (fig. 591) est reliée à un microphone M qui est soumis à l'action de vibrations quelconques produites par un rouage d'horlogerie, ou seulement en mettant une montre contre le microphone : des bornes *a* et *b*, où aboutissent les fils de la pile, partent les deux circuits B et B' qui s'enroulent d'une manière égale mais en sens contraire sur une bobine munie d'un noyau de

fer doux; l'un de ces circuits comprend une boîte de résistance r. Enfin un autre fil fin C, est enroulé sur la bobine et forme un troisième circuit comprenant un téléphone.

Lorsque les courants circulant en B et B′ auront des valeurs déterminées (valeurs égales si les circuits sont identiquement disposés sur la bobine) aucun courant induit ne sera produit; mais il en naîtra aussitôt que, en agissant sur la boîte r, on aura modifié l'intensité de l'un des courants. Il y aura donc des vibrations dans le téléphone, mais le son ne sera perçu que si ces vibrations sont assez fortes, c'est-à-dire que s'il existe une assez grande différence d'in-

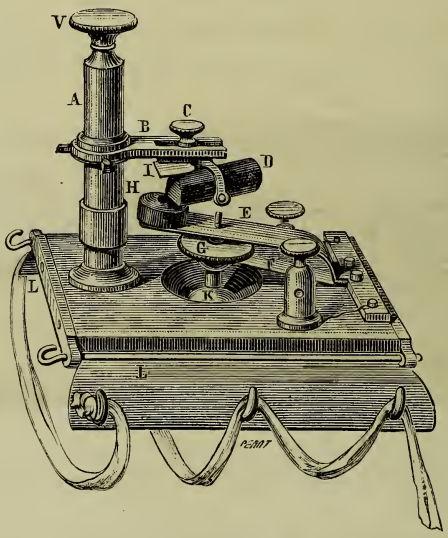


Fig. 592. — Sphygmophone.

tensité entre les courants. La plus petite valeur de la résistance qui permet d'entendre un son peut être prise comme caractérisant l'acuité auditive.

747. Myophone. Sphygmophone. — L'emploi du téléphone et du microphone a été proposé et utilisé dans un certain nombre de cas; il a même semblé tout d'abord que cette sensibilité extrême serait très précieuse pour l'exploration du fonctionnement de certains organes. Il ne semble pas, quant à présent, que le succès ait répondu aux espérances; non pas que les appareils ne soient pas assez sensibles, mais au contraire parce qu'ils sont trop sensibles et qu'il est difficile d'analyser les bruits que l'on perçoit et d'en dégager celui

sur lequel l'attention doit être surtout portée; il est à souhaiter que par la suite, une étude attentive permette d'utiliser ces précieux moyens d'investigation.

M. Boudet de Pâris a donné au microphone (fig. 482) une forme particulière qui sous le nom de *myophone* lui a permis d'étudier le bruit musculaire; le fonctionnement de l'appareil se comprend aisément.

Il en est de même du *sphygmophone* (fig. 592) qui sert à l'étude du pouls et qui est une application du microphone au sphygmographe, l'appareil enregistreur de celui-ci étant remplacé par un appareil produisant le son dans le téléphone.

Il a de même appliqué le microphone au tambour explorateur de Marey (fig. 593); celui-ci relié à un embout par un tube de caout-

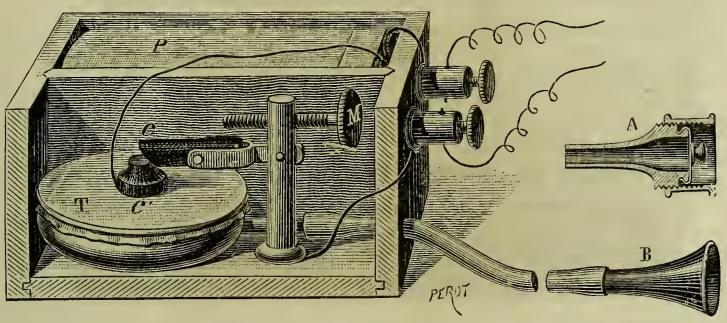


Fig. 593. — Microphone à transmission.

chouc, peut, par exemple s'appliquer sur la peau au niveau des vaisseaux et servir comme sphygmophone. Dans quelques cas, il peut être utile d'adapter à l'embout une membrane tendue munie d'un bouton explorateur.

748. Sonde exploratrice. Emploi de la balance d'induction. — La sonde exploratrice est destinée à reconnaître principalement l'existence de calculs ou autre corps durs dans la vessie. Elle est formée d'une sonde rigide ordinaire A (fig. 594) qui se termine par un cylindre formant poignée et dans lequel se trouvent des charbons qui constituent un microphone; le microphone est placé dans un circuit qui comprend une pile M et un téléphone E.

La sonde étant introduite dans la vessie, si l'appareil est convenablement réglé on n'entend, en mettant le téléphone à l'oreille, qu'un frôlement lorsque le bec de la sonde rencontre la muqueuse;

mais tout choc contre un corps dur produit un bruit sec très nettement perceptible et qui donne une certitude absolue.

Enfin, comme nous l'avons dit, la balance d'induction (616) peut être employée pour diagnostiquer la présence dans le corps de morceaux de métal dont on ne peut vérifier directement l'existence. Lorsque l'appareil est réduit au silence, en approchant une bobine

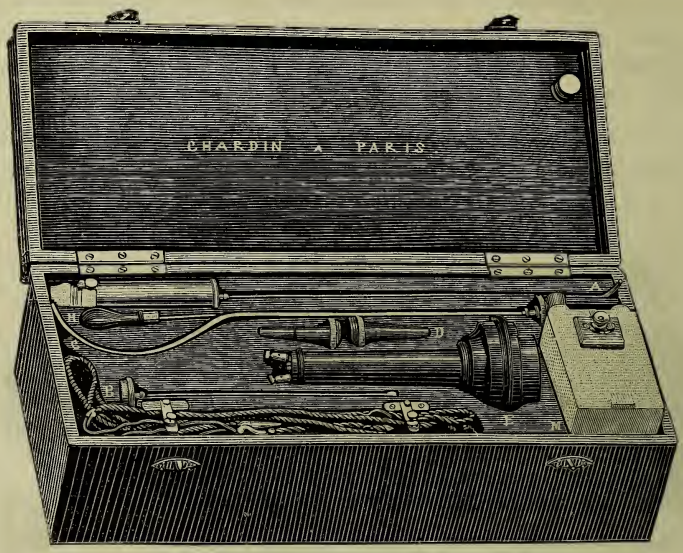


Fig. 594. — Sonde exploratrice à microphone. (*Chardin.*)

de l'endroit où se trouve le métal un bruit doit se produire dans le téléphone même lorsque le métal est à une assez grande distance.

Bien que l'on n'ait pas obtenu des résultats satisfaisants dans le cas du président Garfield pour lequel la méthode avait été imaginée, il ne paraît pas douteux qu'elle ne soit appelée par la suite à rendre de réels services.

APPENDICE

749. — Depuis la publication du premier volume de cet ouvrage, de nombreuses inventions ont été faites que l'on ne saurait faire rentrer dans le cadre des chapitres précédents parce qu'elles se rapportent à des appareils de mesure ou à des appareils de laboratoire. Nous ne pourrions songer à les signaler tous ; il en est quelques-uns cependant qui, par leur originalité, par leur disposition vraiment nouvelles nous paraissent mériter d'être indiqués ; nous les décrirons donc sommairement dans cet appendice qui devrait en réalité figurer plutôt à la fin du premier volume.

Nous faisons de nombreuses omissions, nous ne l'ignorons pas ; mais elles sont volontaires ; nous pensons que, avec les renseignements fournis jusqu'à présent, il est possible de se rendre compte aisément du fonctionnement des instruments que nous passons sous silence.

750. Machine a influence du type de M. Wimshurst. — Cette machine intéressante a été construite par la maison Bréguet d'après les idées de M. Wimshurst (fig. 595) ; elle se compose de deux disques en verre placés parallèlement à une petite distance et pouvant tourner en sens contraire autour d'un axe passant par leurs centres et perpendiculaire à leur direction. Chaque disque porte 12 secteurs formés de feuilles métalliques au centre desquels se trouve une pastille métallique.

Deux peignes métalliques montés sur des pieds en verre et placés aux extrémités du diamètre horizontal embrassent les deux disques ; deux conducteurs diamétraux perpendiculaires l'un à l'autre et inclinés de 45° sur l'horizontale se terminent à leurs extrémités par des pinceaux métalliques qui frottent contre les secteurs par l'intermédiaire des pastilles. Quand la machine fonctionne, le mouvement

des disques doit être tel que les secteurs se déplacent d'un peigne vers le pinceau le plus voisin.

La machine, mue généralement par un moteur électrique, est placée sous une cage en verre. Les conducteurs ou prises de contact

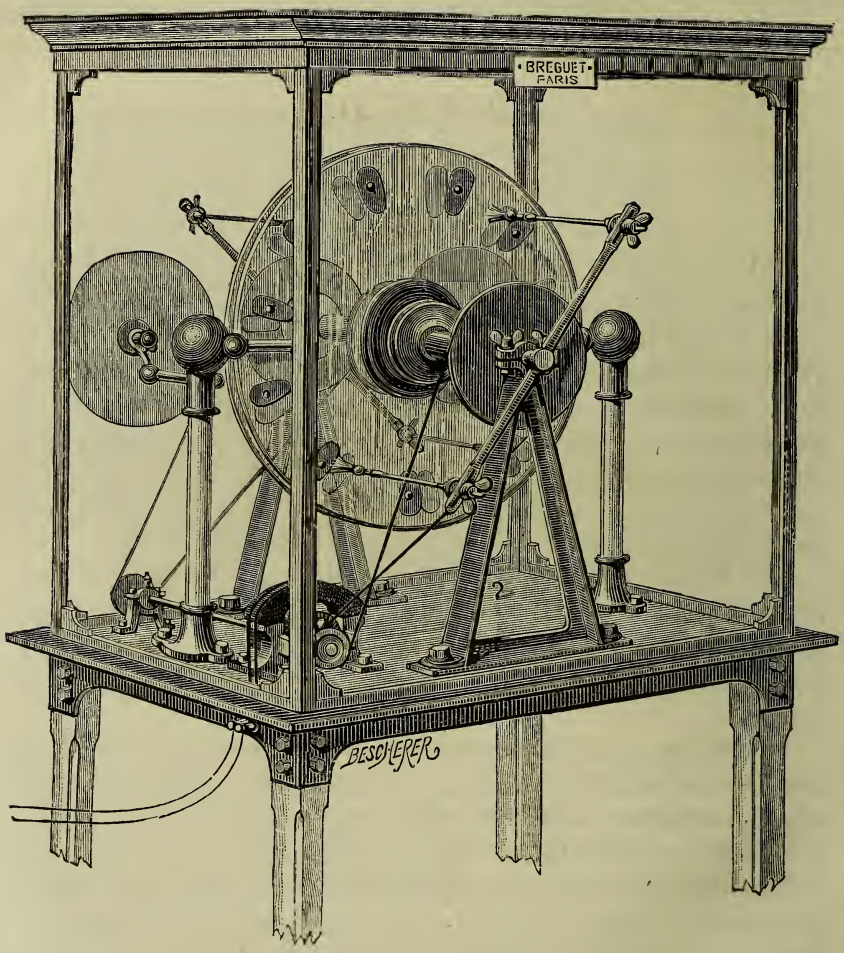


Fig. 595. — Machine à influence Wimshurst. (*Brégu uet.*)

de la machine sont reliés aux peignes et traversent les vitres de la cage : ils peuvent être reliés à des condensateurs, comme dans les machines à influence déjà employées, machine de Holtz, de Voss, etc.

On amorce la machine à l'aide d'une palette ou d'un cylindre

d'ébonite que l'on frotte et que l'on approche de l'un des pinceaux.

La théorie de cette machine n'est pas encore bien connue ; nous ne croyons pas nécessaire de donner de son fonctionnement une explication qui est certainement incomplète [1].

Cette machine présente l'avantage d'un fonctionnement très régulier : elle est peu influencée par l'état hygrométrique de l'air et marche bien, même par des temps humides. De plus elle n'est pas sujette à des renversements de polarité et chacun de ses conducteurs a une charge qui conserve toujours le même signe.

Dans les modèles construits, le mouvement des disques est obtenu par l'action d'un moteur électrique actionné par une pile.

751. Machine rhéostatique de quantité. — M. Planté a donné une nouvelle disposition à la machine rhéostatique que nous avons décrite (317) : elle est analogue comme disposition générale à celle-ci mais les condensateurs qui la composent sont déchargés alors qu'ils sont reliés parallèlement (en quantité) et non en tension. Un petit commutateur que l'on fait tourner rapidement relie les condensateurs successivement à la source et au circuit dans lequel on veut employer la décharge.

Dans des expériences qu'il a réalisées, M. Planté a employé comme source une batterie secondaire de 400 à 800 couples qui avait été chargée par 2 Bunsen : la machine comprenait 160 condensateurs d'une capacité moyenne de 0,015 microfarad chacun. En tournant le commutateur, on obtient une série continue d'étincelles brillantes, mais très courtes.

M. Planté a obtenu à l'aide de cette machine des effets très curieux dont il a étudié quelques-uns ; il explique le rôle de cette machine en admettant que les condensateurs sont chargés au même potentiel que la source, et que l'écoulement de l'électricité lorsque l'on décharge les deux condensateurs se produit sous l'influence de cette différence de potentiel, mais avec cette condition que la résistance des condensateurs agissant alors comme source électrique peut être regardée comme nulle.

752. Voltmètre et ampèremètre de Sir William Thomson. — Ces appareils sont des galvanomètres d'une forme spéciale étalonnés et permettant des vérifications faciles ; ils ont spécialement pour but de permettre des mesures de quantités très différentes comme ordre de grandeur en évitant l'emploi des shunts qui ne donnent pas toujours une exactitude suffisante.

1. Voir *Bull. de la Soc. intern. des électriciens*, nov. 1885.

Ils comprennent une bobine dans laquelle passe le courant et un système magnétique.

La bobine C (fig. 596) a la forme circulaire et est constituée par un conducteur qui, pour le voltmètre est un fil fin d'argent allemand ayant une résistance de plus de 6000 ohms et faisant environ 7000 tours : et pour l'ampèremètre est une lame de cuivre dont la résistance est négligeable. Dans l'un et l'autre appareils la bobine est placée de telle façon que son plan équatorial soit vertical, perpendiculaire à une planchette P que l'on rend horizontale à l'aide de vis calantes. Les extrémités du conducteur aboutissent à deux bornes ou prises de contact qui servent à établir facilement la communication avec le circuit que l'on veut étudier.

Le système magnétique est formé par quatre petites aiguilles

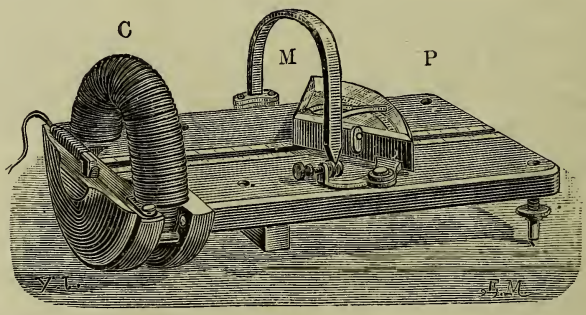


Fig. 596. — Galvanomètre de Sir W. Thomson (*La Lumière électrique*).

aimantées reliées à un index en aluminium, le tout mobile autour d'un axe vertical : le plan des aiguilles passe par le centre de la bobine. L'index se meut au-dessus d'un arc divisé qui est tracé sur une glace formant miroir réfléchissant : on fait les lectures en notant la division qui est sur la droite qui joint la pointe de l'index à son image, ce qui supprime les erreurs de parallaxe.

Le système magnétique et la glace qui porte les divisions sont fixés sur une planchette qui glisse parallèlement à elle-même, de telle sorte que l'axe de rotation des aiguilles reste sur la perpendiculaire au plan équatorial de la bobine passant par son centre ; des divisions tracées sur une ligne parallèle à ce déplacement indiquent la distance de l'axe au centre. En somme le système magnétique se trouve dans des conditions analogues à celles qui se présentent dans la boussole des tangentes ; les divisions tracées sur l'arc

de cercle doivent donc correspondre à des variations égales sur la tangente.

Le système magnétique étant placé à une distance déterminée de la bobine, les indications fournies par l'aiguille seront alors proportionnelles aux intensités du courant qui traverse la bobine; mais pour un même courant, les indications varieront avec la distance, les déviations diminuant quand la distance augmente. Il va sans dire aussi que les déviations dépendent de l'intensité du champ magnétique.

Les divisions caractérisant la distance du système magnétique à la bobine sont obtenues par comparaison.

Pour le voltmètre, par exemple, on cherche la position que doit occuper le système magnétique pour qu'une différence de potentiel de 1 volt amène l'index à la division 1 dans un champ magnétique égal à l'unité; on sait alors que lorsque l'index sera à la division n, la différence de potentiel atteindra n volts; on marque 1 en ce point. Puis on déplace la planchette jusqu'à ce que la même différence de potentiel, 1 volt, amène la pointe de l'index à la division 2; on marquera 2 en ce point et l'on sait que lorsque l'index sera à la division n, la différence de potentiel atteindra $\frac{n}{2}$ volts. On continue ainsi de proche en proche.

Si n est le nombre de divisions sur l'arc gradué, si d est le chiffre lu sur l'échelle rectiligne, E, la différence de potentiel, et H l'intensité du champ magnétique, on aura donc nécessairement :

$$E = H \frac{n}{d}$$

Il faut connaître la valeur de H pour le lieu où est placé le voltmètre et il est utile de la vérifier de temps à autre. On y arrive aisément en faisant une mesure sur un élément dont la force électromotrice soit bien connue : on a ainsi E; l'expérience donne d et n, on en déduit donc H.

Les appareils en usage permettent d'apprécier la force électromotrice à 0,01 de volt près environ et peuvent être utilisés directement jusqu'à 100 ou 120 volts. Au delà de cette valeur, on ajoute à l'appareil un aimant demi-circulaire M dont le plan est vertical et qui a son centre à l'axe de rotation du système magnétique. On augmente ainsi considérablement le champ magnétique, et l'appareil peut mesurer jusqu'à 6000 volts, au moins.

Pour l'ampèremètre, le mode de graduation se fait empirique-

ment de la même façon de telle sorte que I étant l'intensité évalué en ampères, on a

$$I = H \frac{n}{d}$$

L'ampèremètre permet de mesurer jusqu'à 1000 ampères.

Ces appareils sont d'un usage très commode dans la pratique.

753. Mesureur de courants de M. de Lalande. — M. de Lalande

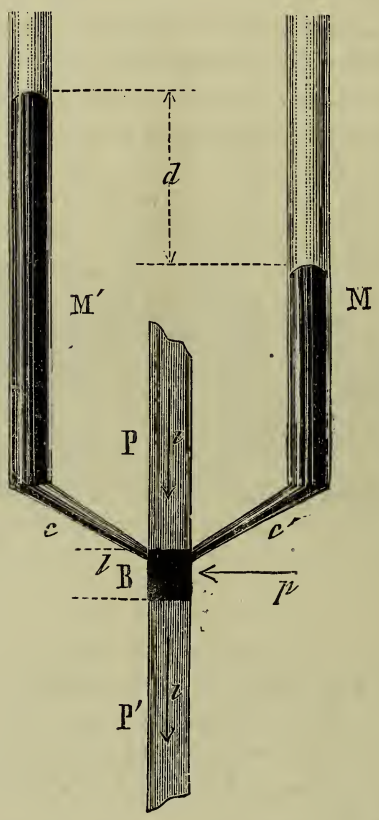


Fig 597.

a imaginé un appareil de mesure des courants fort simple et qui, ne présentant pas d'aimant permanent, est indépendant des variations du magnétisme terrestre.

L'appareil est constitué par un flotteur métallique à l'intérieur duquel on a introduit un faisceau de fil de fer doux. Le flotteur, disposé comme un aréomètre, est introduit dans une éprouvette rem-

plie d'eau jusqu'à un niveau déterminé et entourée d'une bobine dans laquelle circule le courant à mesurer.

Au repos le flotteur prend une certaine position d'équilibre ; mais lorsque le fil de la bobine est traversé par un courant, sous l'action du fer doux, le flotteur s'enfonce d'autant plus que le courant a une plus grande intensité et cet enfoncement permet par conséquent d'évaluer l'intensité.

La tige qui surmonte le flotteur est cylindrique, elle est guidée

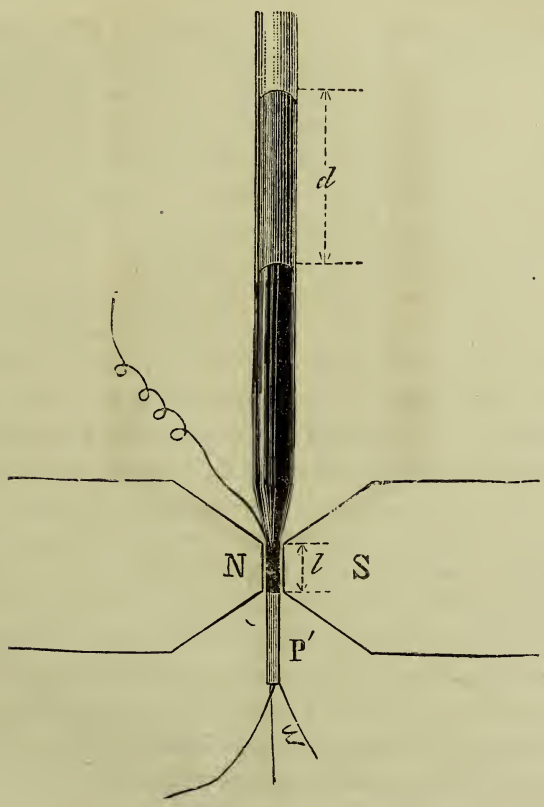


Fig. 598. — Galvanomètre Lippmann.

par un œil métallique dans lequel elle passe au sein du liquide, ce qui rend les fottements très minimes. L'extrémité de cette tige se meut devant une échelle graduée.

Suivant la résistance de la bobine, l'appareil peut servir comme ampèremètre (résistance de 0,01 à 0,02 de ohm) ou voltmètre (résistance de 1700 ohms) ; la sensibilité dépend des dimensions de la

bobine, du flotteur, des fers doux et de la tige ; entre certaines limites, pour chaque appareil, il y a sensiblement proportionnalité entre les intensités et les déplacements.

754. — Galvanomètre a mercure de M. Lippmann [1]. — Le galvanomètre à mercure est fondé sur l'action des aimants sur les courants. Un manomètre à mercure MM′ (fig. 597 et 598) est placé entre les branches d'un aimant fixe, de telle manière que les deux pôles de l'aimant N, S se trouvent à droite et à gauche de la branche horizontale du manomètre.

Le courant électrique que l'on veut mesurer est amené au mercure de cette branche horizontale, et il le traverse verticalement en PP′, c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe du tube. Il se produit dès lors une différence de niveau entre les deux branches du manomètre, différence proportionnelle à l'intensité du courant électrique. Dans l'un des instruments présentés à la Société des électriciens, cette différence était de 23 millimètres pour 1 ampère ; pour un autre, elle était de 58 millimètres par ampère.

Le système formé par un manomètre à mercure placée sous l'influence d'un aimant constitue donc un galvanomètre d'une construction très simple et dont les indications sont exactement proportionnelles à l'intensité du courant électrique. La théorie de son fonctionnement est la suivante : la portion de la colonne de mercure traversée par un courant électrique représente un élément de courant mobile. Cet élément de courant tend à repousser l'aimant placé dans son voisinage, dans une direction déterminée par la règle d'Ampère. Comme l'aimant ici est immobile et que l'élément de courant est mobile, c'est l'élément qui se déplace ; la réaction qu'il subit produit une poussée hydrostatique qui se traduit par la dénivellation du mercure. Le mercure s'arrête dès que la pression hydrostatique fait équilibre à la poussée électromagnétique.

Soient i l'intensité du courant électrique et p la pression hydrostatique mesurée par la dénivellation du mercure. On peut calculer p en fonction de i. A cet effet, supposons, ce qui est le cas en réalité, que l'élément de courant ait la forme d'un parallélipède rectangle dont la longueur comptée dans le sens du courant électrique soit l. La force électromagnétique qui tend à déplacer l'élément de courant est égale à

$$Hli$$

1. Communication faite à la *Soc. intern. des électriciens*, 2 juillet 1884.

H étant l'intensité du champ magnétique : telle est l'expression de la force. Pour avoir la valeur de la pression hydrostatique p, il faut diviser l'expression de la force par l'aire de la surface sur laquelle elle s'exerce. Cette surface est $l\,\varepsilon$, ε étant l'épaisseur de la colonne mercurielle comptée dans la direction des lignes de force magnétiques. En effectuant le quotient, on obtient :

$$p = \frac{Hi}{\varepsilon}$$

La sensibilité de l'instrument va donc en augmentant avec l'intensité magnétique et avec la minceur de la colonne de mercure.

En conséquence, on a armé les pôles de l'aimant de deux masses de fer doux qui arrivent presque au contact l'une de l'autre, et qui ne laissent entre elles qu'une sorte de fente où l'intensité magnétique est considérable et uniforme. Dans cet intervalle se trouve une petite chambre à mercure rectangulaire, qui fait partie de la branche horizontale du manomètre qui est parcourue verticalement par le courant électrique. L'épaisseur ε de la lamelle de mercure parcourue par le courant n'est que de $\frac{2}{10}$ de millimètres.

La forme et les dimensions de cette lamelle sont telles que la poussée électromagnétique soit la même en tous ses points et qu'il se produise par conséquent un état d'équilibre du mercure, sans tourbillons intérieurs.

755. Électrodynamomètre a mercure; compteur a mercure de M. Lippmann. — L'électrodynamomètre à mercure est basé absolument sur le même principe que le galvanomètre dont nous venons de donner la description ; il n'en diffère que parce que l'aimant est remplacé par une bobine dont le fil est traversé par le courant qui passe dans le mercure.

Cet appareil, comme les électrodynamomètres ordinaires, donne la mesure du carré de l'intensité du courant ; il permet de mesurer les courants alternatifs. Il présente l'avantage que, à l'exception du mercure, toutes les pièces qui le constituent sont invariables de position ; les indications sont donc rigoureusement proportionnelles au carré de i.

Cet appareil se prête, lorsqu'il a été gradué, à la mesure absolue des courants. Dans un appareil présenté à la Société des électriciens, un courant dont l'intensité était de 1 C. G. S (10 ampères) produisait une pression de 650 dynes (environ 650 ^{mgr}) par centimètre carrés.

Enfin, sur le même principe, M. Lippmann a fait construire un compteur d'électricité : l'appareil ressemble au galvanomètre, seulement la chambre lamellaire à mercure communique d'une part

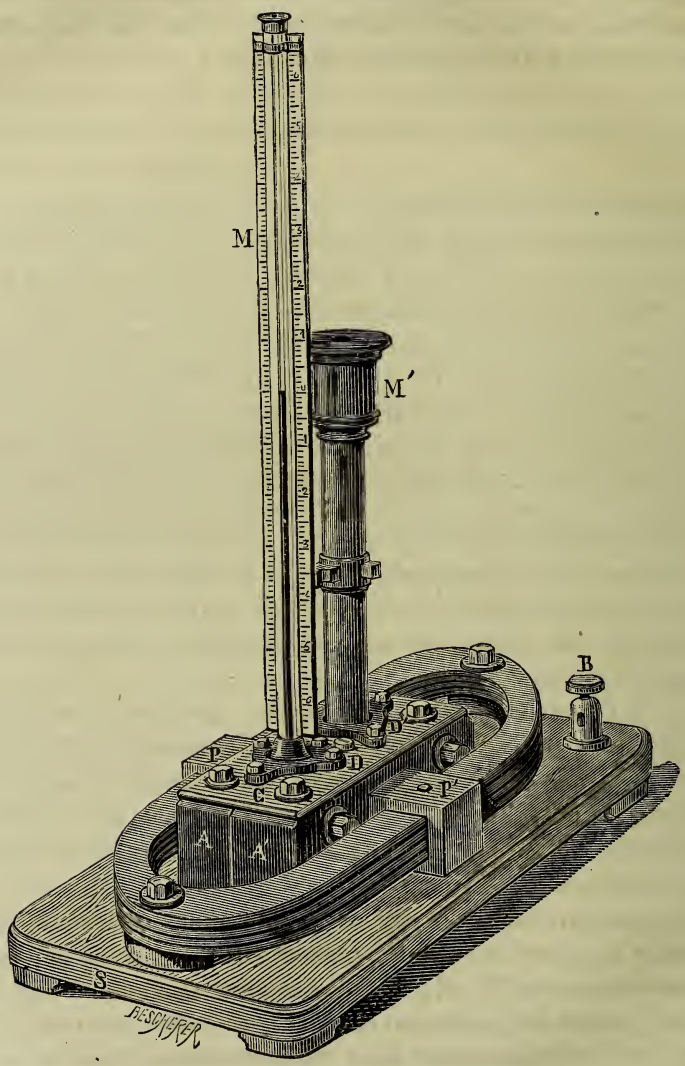


Fig. 599. — Galvanomètre Lippmann. (*Bréguet.*)

avec un réservoir à mercure, de l'autre avec un tube recourbé dont l'extrémité ouverte se trouve au-dessus du réservoir. Lorsque le courant passe, l'action exercée par l'aimant sur le courant chasse le mercure de la chambre vers le tube ; le mercure s'écoule d'une

manière continue par l'orifice de celui-ci et retombe dans le réservoir.

Le poids du mercure qui s'écoule dans l'unité de temps est proportionnel à l'intensité du courant et pour un temps quelconque, proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé l'appareil.

Pour connaître la quantité d'électricité, il suffit donc d'évaluer le poids de mercure écoulé, ce à quoi l'on arrive, par exemple, par l'emploi d'un basculeur à augets dont l'axe est relié à un compteur qui indique le nombre de mouvements du basculeur. L'appareil doit être gradué expérimentalement.

756. Compteur d'électricité Cauderay. — Cet appareil mesure les quantités d'électricité qui traversent un circuit, en enregistrant d'une manière spéciale l'intensité du courant, en vertu de la relation $Q = It$; c'est un enregistreur des indications d'un ampèremètre, enregistreur qui fonctionne chaque fois qu'un coulomb a passé, et qui fait avancer une aiguille sur un cadran. Si le courant est de 1 ampère, l'aiguille doit avancer une fois par seconde, elle doit avancer 2, 3... n fois par seconde si le courant est de 2, 3... n ampères. Voici comment ce résultat est obtenu en principe : derrière l'aiguille de l'ampèremètre a (fig. 600) se trouve un cylindre à axe horizontal qui tourne avec une vitesse de 1 tour par seconde. A sa surface sont tracées des sections droites dont la position est telle qu'elles sont respectivement en face de l'aiguille lorsque celle-ci est au repos ou qu'elle indique un courant de 1, 2, 3... n ampères. Des chevilles métalliques sont implantées sur ces sections en nombre variable : il n'y en a pas sur la section qui correspond à la position de repos de l'aiguille, il y en a 1 sur les sections correspondant à la position de l'aiguille pour 1 ampère (il y a deux sections pour chaque intensité, de part et d'autre de la position moyenne), il y en a 2 sur les sections suivantes, et successivement 3, 4... n sur les sections qui correspondent à 3, 4... n ampères.

L'aiguille de l'ampèremètre est terminée à sa partie supérieure par une pièce métallique qui frotte sur les chevilles ; on voit dès lors que le nombre des contacts, pour un tour du cylindre, c'est-à-dire pour 1 seconde sera de 1, 2, 3... n suivant que le courant étant de 1, 2, 3... n ampères, l'aiguille sera située en face de la section numérotée 1, 2, 3... n, c'est-à-dire que chaque contact correspondra bien au passage d'un coulomb, puisqu'il y aura n contacts, lorsque le courant ayant une intensité de n ampères il passera n coulombs en 1 seconde. Il suffit dès lors que chaque contact de l'aiguille et d'une cheville soit relié mécaniquement ou mieux élec-

triquement avec un mécanisme qui fasse avancer une aiguille d'une division sur un cadran pour que les indications lues sur ce cadran représentent en coulombs la quantité d'électricité qui a traversé le circuit de l'ampèremètre.

L'ampèremètre employé est un modèle de M. Deprez, la bobine présente une très faible résistance $0^{ohm},01$; on peut le régler d'après un étalon en déplaçant les pièces polaires qui sont fixées à des vis. Le mouvement du cylindre à chevilles est obtenu pour l'action d'un balancier circulaire réglé au moyen d'un spiral ; l'arbre du balancier porte deux armatures de fer doux attirées par des électro-aimants pour entretenir le mouvement ; le courant qui les anime est très minime et peut être négligé.

Dans la pratique, le coulomb est une quantité trop petite pour

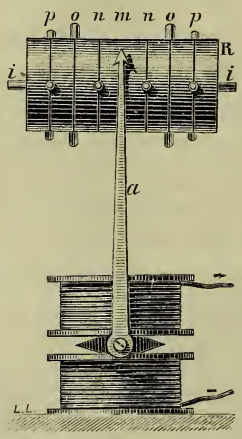


Fig. 600. — Compteur d'électricité (*Cauderay*).

qu'il ait lieu de la choisir comme unité : aussi les appareils sont-ils disposés pour compter seulement par centaines de coulomb. Pour obtenir ce résultat, il suffit sans rien changer à l'appareil de faire tourner le cylindre moins vite, de manière qu'il exécute un tour en 100 secondes : il est clair en effet que, dans ces conditions chaque cheville qui rencontrera l'aiguille correspondra à 100 coulombs. L'unité industrielle commode paraît devoir être le myriacoulomb qui vaut 10000 coulombs.

Il va sans dire que, moyennant des modifications de la vitesse du cylindre, il sera possible d'obtenir que les aiguilles de l'enregistreur indiquent la dépense évaluée à l'aide de telle unité qui con-

viendra ; c'est ainsi, par exemple qu'au lieu d'évaluer cette dépense en coulombs (c'est-à-dire en ampères-secondes) ou multiples de coulomb on pourra, pour le cas de l'éclairage, l'évaluer en lampe-heures, le fonctionnement de la lampe à l'état normal correspondant à une dépense déterminée.

Dans les appareils où la rotation du cylindre n'est pas rapide, dans les appareils pratiques, le mouvement du balancier est transmis au cylindre par l'intermédiaire de levier agissant par des doigts sur une roue à rochets. La régularité du mouvement subsiste quelle que soit la position de l'appareil qui n'a pas besoin d'être maintenu vertical.

Enfin, les dents implantées sur le cylindre ne présentent pas sur chaque section droite l'égalité d'espacement que nous avons imaginée ; elles sont disposées suivant une règle particulière afin que, lorsque l'aiguille se trouvera entre deux divisions, la pièce métallique qui la termine rencontrant les dents de deux sections droites à la fois enregistre un chiffre représentant la valeur intermédiaire.

FIN DU TOME DEUXIÈME

TABLE ALPHABÉTIQUE

Acièration des planches gravées, II, 25.
Accumulateurs Faure, I, 385; — de Kabath, I, 385; — de Reynier, II, 4.
Actions calorifiques donnant naissance à un courant, I, 158; II, 40.
Actions chimiques donnant naissance à un courant, I, 138; II, 1.
Actions mécaniques donnant naissance à un courant, I, 174; II, 133.
Affinage des métaux, II, 27.
Aiguille aimantée, mobile autour d'un axe, action de la terre, I, 24.
Aiguilles aimantées astatiques, I, 249.
Aiguilles thermo-électriques, II, 42.
Aimantation par frottement, I, 7; — par influence, I, 6; méthodes diverses, I, 35.
Aimants naturels, I, 1; — artificiels, I, 1; leurs propriétés, I, 2, 3, 5, 32; leur action sur les courants, I, 108; sur les solénoïdes, I, 173; leur mouvement produit des courants induits, I, 176.
Ajustage des monnaies, II, 26.
Alcools (Rectification des), II, 34.
Allumoirs électriques, II, 56, 467.
Ammètre, I, 296.
Amorces électriques, II, 61, 469.
Ampère (Formule d'), I, 164; — (Règle d'), I, 109.
Ampère (Unité d'intensité de courant), I, 213.
Ampèremètre, II, 535.
Analyse électrolytique, II, 31.
Anémométrographes, II, 436.
Anode, II, 12; — soluble, II, 12.
Appareil pour le block-système, II, 337.
Appareils d'induction employés en physiologie et en médecine, II, 512.
Appel d'incendie, II, 332.
Arc voltaïque, II, 50.
Argenture électrique, II, 15.
Armature des aimants, I, 39.
Astaticité des systèmes magnétiques, I, 28, 249; — des circuits parcourus par des courants, 169.
Attraction électrique, I, 43, 72; ses lois, I, 53; — magnétique, I, 1, 32; ses lois, I, 10; — des courants, I, 165.
Aurores polaires, II, 479.
Avertisseurs, II, 336.
Balance électrique de Becquerel, I, 281; — de Lallemand, I, 282; — de Debrun, I, 282; — d'induction, II, 164, 531; — de torsion, I, 10, 52.
Batterie (Pile montée en), I, 129.
Batteries électriques, I, 94; — secondaires, I, 148, 384.
Blanchiment électrique, II, 32.
Bluteur électrique, II, 464.
Bobines d'induction, I, 175; — de Ruhmkorff, I, 188, 388; — à chariot de Dubois-Reymond, II, 511.
Bobines de résistance, I, 307.
Bolomètre, II, 48.
Bougies électriques Jablochkoff, II, 119; — de Wilde, II, 123.
Bouteille de Leyde, I, 91; — à armatures mobiles, I, 93.
Boussoles de déclinaison, I, 218; — d'inclinaison, I, 26, 226; — de Brunner (théodolithe boussole), I, 220; — des cosinus, I, 273; — de Gambey, I, 218; — de Gaugain, I, 260; — des sinus; I, 261; — des tangentes, I, 258; — des variations en déclinaison, I, 221; — des variations en inclinaison, I, 228.
Caisse de résistance, I, 307.
Calage (Angle de) des balais, II, 167.
Capacité électrique, I, 96, 213, 306; — unité pratique (Farad), I, 213, 306.
Caractéristique des machines d'induction, II, 141, 143; — *externe*, II, 149.
Casse-fils, II, 464.
Cathode, II, 12.
Chaleur dégagée par le passage des courants, I, 158, II, 50, 55.
Champ magnétique, I, 16, 20, 174.
Chaîne galvanique de Pulvermacher, I, 358.
Charge électrique, I, 49.

Chemins de fer (Appareils électriques pour l'exploitation des), II, 337, 451.
Choc en retour, II, 485.
Chronographes, II, 405.
Circuit électrique, I, 103; — son influence sur l'intensité, I, 122.
Cloches Leopolder, II, 257.
Collecteur des machines d'induction, I, 197; II, 137, 164; — double pour pile médicale, II, 498.
Commutateurs, I, 241; II, 269; — dans les machines d'induction, I, 193; II, 164.
Compteur d'électricité, II, 541, 543; — de tours, II, 433; — totalisateur, II, 434.
Condensateur à plateaux, I, 87; son emploi dans l'électromètre, I, 95; — pour la mesure des forces électromotrices, I, 298; — dans les bobines d'induction, I, 390.
Condensation électrique, I, 87.
Condensation des fumées et des poussières par l'étincelle, II, 466.
Conducteurs (Bons ou mauvais), I, 42; — tableau, I, 201.
Conductibilité électrique, I, 123; — tableau, I, 202.
Contrôleur des aiguilles, II, 457; — des disques, II, 451; — de l'éclairage des disques, II, 452; — de la marche des trains, II, 459; — des rondes, II, 462.
Coulomb (Lois de), magnétisme, I, 10; électricité, I, 54.
Coulomb (Unité de quantité), I, 213.
Couple directeur terrestre, I, 20; son action sur une aiguille aimantée suspendue, I, 23; composantes horizontales, verticales, I, 23.
Courants alternatifs et — redressés, II, 156.
Courant électrique, I, 104; mesure de son intensité, I, 108, 335; produit des actions calorifiques, I, 151; chimiques, I, 133; mécaniques, I, 164; agit sur l'aiguille aimantée, I, 172; sur les courants mobiles, I, 165; est dirigé par un aimant, I, 173; par un courant, I, 165; peut prendre naissance par des actions calorifiques, I, 158; chimiques, I, 138; mécaniques, I, 174; — en médecine et en physiologie, II, 490.
Courants induits, I, 175; — de divers ordres, I, 180; — dans les plaques métalliques, I, 187; — en médecine et en physiologie, II, 504.
Courants inducteurs, I, 175.
Courants interrompus en physiologie, II, 502.
Courants instantanés; leur mesure par les galvanomètres balistiques, I, 277.
Creuset électrique, II, 55.
Cuivrage électrolytique, II, 15.
Curb-sender automatique, II, 329.
Décharge disruptive, I, 98.
Déclinaison; sa mesure par les boussoles, I, 216.
Densité électrique, I, 57.
Déperdition de l'électricité, I, 55.
Dépôt électrolytique des métaux, II, 13.
Diamagnétisme, I, 32; tableau des corps diamagnétiques, 200.
Dimensions des unités, I, 207.
Distribution de l'électricité, II, 219; exemples, II, 236.
Distribution de l'électricité dans les corps bons conducteurs, I, 58; — dans les corps mauvais conducteurs, I, 60.
Distribution du magnétisme, I, 27.
Dorure électrolytique, II, 15.
Double excitation, II, 161, 226.
Duplicateur, I, 342.
Dyne, unité de force, I, 207.
Eclairs, II, 481; — en boule, 483.
Eclairage électrique, généralités, II, 62; son présent et son avenir, 130.
Ecrans électriques, I, 70.
Effets calorifiques produits par les courants, I, 5 ; lois de Joule, I, 151; — par l'étincelle, 100; applications, II, 55; II, 469; II, 514.
Effets chimiques produits par les courants, électrolyse, I, 133; — par l'étincelle, I, 100; applications, II, 11.
Effets mécaniques produits par les courants, I, 165; — par l'étincelle, I, 101.
Effluves électriques, II, 38.
Electricité, I. 42; — atmosphérique, II, 476.
Electricité dissimulée, I, 88.
Electrisation des corps par le frottement, I, 41; — par le contact, I, 42; — par influence, I, 67.
Electro-aimants, I, 173; applications, II, 199.
Electrodes, I, 103, 133; polarisation des —, I, 141; — impolarisables, II, 501.
Electro-diapasons, II, 401.
Electro-dynamiques (Phénomènes), I, 164.
Electro-dynamomètre, I, 279; — à mercure, II, 541.
Electro-métallurgie, II, 29.
Electro-trieuses, II, 199.
Electrolyse, I, 133; ses lois, I, 137, 149; conditions générales d'application, II, 6; applications industrielles, II, 11; applications chirurgicales, II, 520.
Electrolyte, I, 133.
Electro-mégaloscope, II, 524.
Electromètre absolu, I, 329; — capillaire de Lipmann, I, 302; — condensateur, I, 95; — à quadrants de Thomson, I, 62; modèle Mascart, I. 299; leur emploi pour la mesure des forces électromotrices, I, 299.
Electrophore, I, 78.
Electroscope à feuilles d'or, I, 76; — de Saussure, II, 476.
Elément de pile, I, 103.
Enclenchement électrique, II, 455.
Enregistrement photographique des variations magnétiques, I, 239.
Enregistreurs électriques, II, 407.
Epaisseur électrique, I, 57.
Erg, unité de travail, I, 207.
Etalonnage des boussoles et des galvanomètres, I, 284; II, 535.
Etalons, I, 328; — de capacité, Microfarad, I, 306; — de résistance, Ohm, I, 334.
État variable, *état permanent* des courants, I, 112.
État neutre, I, 49.
Etincelle électrique, I, 74, 98; applications diverses, II, 466.
Excitateur à manches de verre, I, 90.
Explorateur électrique, II, 526.

Exploseurs, II, 472.
Extra-courants, I, 178; leur effet dans les bobines d'induction, I, 390.
Fantôme magnétique, I, 3, 17.
Farad (Unité de capacité), I, 213, 308.
Faraday (Lois de), I, 136.
Fermeture d'un circuit, I, 103; extra-courant de —, I, 176.
Fluides magnétiques (Hypothèses des), I, 8.
Force coercitive, I, 7.
Force contre-électromotrice dans l'électrolyse, II, 6; — dans l'arc voltaïque, II, 53; — dans les machines d'induction, II, 209.
Forces électromotrices, I, 104; leur mesure, I, 131, 150, 289, 329; unité (Volt), I, 213.
Formule des piles, I, 126; — des courants dérivés, 129 (note).
Foudre, II, 481.
Freins électriques, II, 201.
Galvanocautère, II, 514.
Galvanomètres, I, 108, 245, 261: — Ayrton et Perry, I, 277; — balistique, I, 276; — Bourbouze, I, 275; — Bréguet, I, 275; — dead beat, I, 268; — Deprez et d'Arsonval (à indications rapides), I, 271; — de démonstration de Ducretet, I, 275; — différentiels, I, 109, 254; — à indications proportionnelles, I, 256; — à mercure de Lippman, II, 538; — de Sir W. Thomson, I, 268; II, 535; leur sensibilité, I, 263; emploi du shunt, I, 265.
Galvanomètres étalonnés, I, 283; — de Gaiffe, I, 285; — Marcel Deprez, I, 293; — Ayrton et Perry, I, 296; — W. Thomson, II, 535.
Galvanoplastie, II, 13; applications diverses, II, 23.
Galvanopuncture, II, 522.
Générateurs secondaires, II, 233.
Horloges électriques, II, 387.
Hypothèses relatives au magnétisme, I, 8, 34; — à l'électricité, I, 46.
Inclinaison, I, 5, 26; sa mesure par les boussoles, I, 224; par la méthode de Bergmann, II, 229.
Indicateur d'incendie, II, 422; — de niveau, II, 411; — de pression, II, 432; — de température, II, 419; — de vitesse, II, 202.
Inducteurs, II, 159.
Induction, I, 175; — par la terre, I, 179; — dans les masses métalliques, I, 185 (Voir *Bobine* et *Machine*).
Induits dans les machines en général, II, 135, 162.
Influence électrique, I, 44, 66; — dans les attractions et les répulsions, I, 72; — dans les pointes, I, 75.
Intensité d'un courant, I, 108; sa mesure, I, 108, 335; choix d'une unité pratique (Ampère), I, 213.
Intensité du magnétisme terrestre, sa mesure, I, 230.
Interrupteurs dans les bobines d'induction; I, 181; — Marcel Deprez, I, 394; — Foucault, I, 396; — à mercure simple, I, 398; — Gaiffe, II, 507; — Trouvé, II, 508.
Isolants (corps) I, 42.
Isolateurs, II, 264.
Jack-knife, II, 376.
Joule (Lois de), I, 151.
Lampes à arc, II, 80 (Voir *Régulateurs*); — à écart invariable, II, 125.
Lampe à incandescence, II, 64; — Bernstein, II, 68; — Cruto, II, 68; — Edison, II, 65; — Gérard, II, 68; — Lane-Fox, II, 68; Maxim, II, 68; — Muthel, II, 68; — Swan, II, 68; — applications diverses, II, 74.
Lampe-soleil, II, 127.
Lenz (Loi de), I, 175.
Lignes de force, I, 16, 406.
Ligne neutre, I, 2.
Lignes télégraphiques aériennes, II, 262, sous-marines, II, 267, souterraines, II, 266, téléphoniques, II, 355.
Loch électrique, II, 433.
Locomotive électrique, II, 205.
Longueur réduite, I, 124.
Lumière électrique, II, 62, 74.
Machines d'induction; théorie générale, I, 188, 406; II, 134; description générale des éléments essentiels, II, 158; — employées en physiologie et en médecine, II, 512 (Voir *Machines dynamo et magnéto-électriques*, *Machines à excitatrice*, *Reversibilité*, *Induit*, *Inducteur*, *Collecteur*).
Machines dynamo-électriques, généralités, I, 197, 406; II, 143.
Machines dynamo-électriques à courants continus : — Brush, II, 195; — Edison, II, 186; — Gramme, II, 179; — Siemens, I, 183; — à courants alternatifs : Ferranti, II, 192; — Gordon, II, 192; — Gramme, II, 193; — Lontin, II, 193; — Siemens, II, 190; — Wilde, II, 190.
Machines électriques, I, 78, 340; — d'Armstrong, I, 82; — de Bertsch, de Carré, I, 86; — de Holtz, I, 83; à conducteurs diamétral, I, 341; — de Nairne, I, 81; — de Ramsden, I, 79; — de Sir W. Thomson, I, 342; — de Tœpler, I, 346; — de Van Marum, I, 81; — de Varley, I, 344; — de Voss, I, 349; — pour l'exploitation des mines, II, 471; — Wimshurst, II, 533.
Machines à excitatrices, Gramme, II, 190, 193; — Ladd, II, 190; — Wilde, II, 189.
Machines magnéto-électriques, généralités, I, 197, 406, II, 141; — de l'Alliance, II, 169; — de Clarke, I, 191; — de Gramme, I, 194, 403; — de Méritens, II, 173; — de Page, I, 194; — de Pixii, I, 190; — de Siemens, II, 177.
Machine rhéostatique de Planté, I, 350; — de quantité, II, 535.
Magnétiques (Corps), I, 2, 32; tableau, I, 280.
Magnétisme, I, 1; — rémanent, I, 9; — terrestre, I, 9, 20, 407; détermination de ses éléments, I, 216, 224, 230; leur enregistrement photographique, I, 239.
Magnétomètre balance, I, 235; — bifilaire, I, 235; — de Gauss, I, 230; — de Weber, I, 257.
Masses magnétiques, I, 14.
Masson (Roue de), I, 119.
Médecine (Application de l'électricité à la , II, 489.
Méridien magnétique, I, 5; sa détermination par les boussoles, I, 216.

Mesure des capacités, I, 306 ; — des forces électromotrices, I, 289, 329; — des intensités, I, 108, 335; des quantités d'électricité, I, 286, 336 ; — des résistances, I, 307, 333, — des galvanomètres, I, 321; — des piles, I, 323.
Mesures magnétiques en unités absolues, I, 326 ; — électro-magnétiques en unités absolues, I, 327.
Mesureur de courants, II, 538.
Métaux (Affinage des) par l'électrolyse, II, 27 ; — (Dépôt des), II, 13.
Météorographe d'Olland, II, 450; — de Theorell, II, 450; — de Van Rysselberghe, II, 440.
Microfarad, I, 306.
Microphone, II, 351 ; — Ader, II, 360; — Bert et d'Arsonval, II, 360 ; — Berthon, II, 361; — Boudet de Pâris, II, 361 ; — Hughes, II, 351.
Moments magnétiques, I, 14, 20 ; leur comparaison, I, 236 ; leur mesure absolue, I, 237.
Montage des piles en série, I, 127 ; — en batterie, I, 129 ; — en opposition, I, 131.
Moteurs électriques, II, 201 ; machines d'inductions comme —, II, 203.
Multiplicateur, I, 109, 245.
Myophone, II, 531.
Œrsted (Expérience d'), I, 109, 172.
Ohm (Lois d'), I, 124.
Ohm (Unité de résistance), I, 214, 307.
Opposition (Eléments montés en), I, 131.
Oscillations (Méthode des), I, 13.
Paratonnerres à tige, II, 484; — Melsens, II, 487 ; — télégraphique, II, 277.
Peltier (Phénomène), I, 151.
Pendule magnétique, I, 1; — électrique, I, 42.
Phénomène Peltier, I, 157 ; — Thomson, I, 158.
Photophore, II, 76.
Photoscope, II, 453.
Physiologie (Application des courants en), II, 489.
Piles, I, 103, 105 ; — hydro-électriques, leur théorie, I, 138; — au bichromate de potasse, I, 148, 375, 378 ; — au bisulfate de mercure, I, 364, 365 ; — de Bunsen, I, 147, 372 ; — de Callaud, I, 360 ; — au chlorure d'argent, I, 145, 359, 361 ; — de Daniell, I, 146, 366 ; — de Fauché, I, 378 ; — de Gaiffe, I, 361, 364, 368 ; — de Grove, I, 147 ; — de Guérin, II, 3 ; — de Lalande et Chaperon, II, 2 ; — de Latimer Clark, I, 372 ; — de Leclanché, I, 148, 361, 363 ; — de Marié-Davy, I, 374 ; — de Muncke, I, 356 ; — de Pulvermacher, I, 359 ; — de Sir W. Thomson, I, 371 ; — de Trouvé, I, 365, 370, 378 ; de Volta, I, 144, 352 ; — de Warren de la Rue, I, 359 ; — de Wollaston, I, 355 ; — de Young, I, 356 ; — humides, I, 370, 380 ; — sèches, I, 342 ; — à gaz, I, 148 ; — secondaires Planté, I, 148, 382 ; — thermo-électriques, I, 161, 386 ; — de Clamond et Carpentier, II, 40 ; — de Noé, I, 386 ; — pour l'inflammation des mines, II, 62 ; — transportable Trouvé, II, 77 ; — médicale, II, 494.
Pince exploratrice, II, 526.
Plan d'épreuve, I, 56.
Polarisation des électrodes, I, 141.
Pôles des aimants, I, 2, 5, 31 ; — attractions et répulsions réciproques, I, 5 ; — des solénoïdes, I, 170 ; — de la pile, I, 106.
Polyscope, II, 523.
Pont différentiel, II, 528.
Pont de Wheastone, I, 132, 310.
Poste télégraphique, II, 258; — téléphonique, II, 370.
Potentiel, I, 60; sa mesure, I, 62; propriétés principales, I, 64.
Pouvoir des pointes, I, 59.
Pression électrique, I, 58.
Protection électro-automatique des trains, II, 459.
Quantité d'électricité, I, 51 ; ses rapports avec l'intensité, I, 119 ; — moyens de mesure, I, 286, 336 ; unité pratique (Coulomb), 213.
Rectification des alcools, II, 34.
Régulateurs pour lampes à arc, II, 80 ; — Archereau, II, 83 ; — Brush, II, 111 ; — Bürgin, II, 87 ; — Cance, II, 86 ; — Foucault, II, 94 ; — Gaiffe, II, 84 ; — Gérard, II, 99 ; — Gramme, II, 101 ; — Jaspar, II, 84 ; — de Mersanne, II, 103 ; — Serrin, II, 90 ; — Siemens, II, 108 ; — à variation d'intensité, II, 82 ; — à dérivation, II, 98 ; — différentiels, II, 107 ; comparaison, II, 115.
Régulateur de température, II, 429.
Relais en télégraphie, II, 272.
Remise à l'heure par l'électricité, II, 394.
Rendement dans l'électrolyse, II, 9; — dans le transport de l'énergie, II, 242.
Répartiteur, II, 97.
Replenisher, I, 342.
Répulsion des corps électrisés, I, 43, 72 ; — des courants, I, 165 ; — des pôles magnétiques, I, 5.
Résistance, I, 124; sa mesure, I, 115 ; unité pratique (Ohm), I, 214, 307; influence de la température, I, 319 ; tableaux, II, 202, 408 ; — des corps en contact, I, 320 ; — des liquides et des gaz, I, 321 ; — des substances organisées, I, 321 ; — (Bobines, boîtes, caisses de), I, 307, 308.
Reversibilité des machines d'induction, II, 206.
Rhéocorde, I, 314.
Rhéophores, I, 103.
Rhéostat, I, 316.
Rhéotrope, I, 119.
Roue à interruption, ou de Masson, I, 119.
Ruhmkorff (Bobine de), I, 188, 389 ; — cloisonnée, I, 393 ; emploi du condensateur, I, 390 ; modèles divers d'interrupteurs, I, 183, 394, 396, 398 ; II, 507, 508.
Rupture d'un circuit, I, 103 ; extra-courant de —, I, 176.
Section réduite, I, 124.
Sélénium, variations de sa résistance, I, 319.
Série (Pile montée en), I, 127.
Sensibilité des galvanomètres et des boussoles, I, 263.
Shunt, shuntage, I, 265.

Sifflet électromoteur, II, 453.
Signal-électrique de Marcel Deprez, II, 409.
Siphon-recorder, II, 331.
Solénoïdes, I, 170 ; leurs actions sur des courants, I, 171 ; sur les solénoïdes, I, 171 ; leur direction par l'action terrestre, I, 172.
Sonde exploratrice, II, 531.
Sonneries électriques, II, 245; dispositions diverses, I, 249 ; tableaux indicateurs, II, 253; — magnéto-électriques, II, 254.
Sonomètre électrique, II, 365.
Spectre magnétique, I, 3, 17.
Sphygmophone, II, 530.
Teinture par l'électrolyse, II, 36.
Télégraphe, Principes, II, 257 ; — à aiguilles (Wheatstone), II, 288 ; — à cadran, II, 270 ; — Estienne, II, 289 ; — Morse, II, 284 ; — autographique Meyer, II, 322 ; — harmonique, II, 314 ; — *imprimeur*, Baudot, II, 315 ; — Hughes, II, 294 ; — sous-marin, II, 326 ; — de quartier, II, 336 (Voir *Transmission*, *Transmetteur*.
Telphérage, II, 240.
Téléphone : généralités, II, 343 ; — Ader, II, 357 ; — d'Arsonval, II, 358 ; — Bell, II, 343 ; Colson, II, 359 ; — Édison, II, 350 ; — Gower, II, 356 ; — Ochorowicz, II, 359 ; — à marteau, II, 362 ; — son emploi comme galvanoscope, II, 363 ; — dans la balance d'induction, II, 364 ; — comme moyen de correspondance, II, 368.
Tension électrique, I, 57.
Thermo-électrique (Élément, pile), I, 161, 386, II, 40.
Thermomètre électrique, II, 44, 46, 47, 525.
Thomson (Phénomène), I, 158.
Tonnerre, II, 481.
Traction électrique des chemins de fer, II, 239.
Transformateurs Gaulard et Gibbs, II, 233, Zipernowsky, II, 235.
Transmetteur automatique Wheatstone, II, 301 ; — téléphonique, II, 360 (Voir *Microphone*).
Transmission simultanée des dépêches, II, 307 ; systèmes diplex, II, 311 ; — duplex, II, 308 ; — multiplex Baudot, II, 318 ; — par cable sous-marin, II, 326 ; — téléphonique, II, 353, 368 ; — télégraphique et téléphonique simultanée, II, 382.
Transport du travail mécanique par l'électricité, II, 206 ; étude des conditions, II, 207 ; rendement, II, 211, 242.
Trembleuse, II, 245.
Unités absolues, I, 15, 205 ; leur rapport dans divers systèmes, I, 338 ; — pratiques l'électricité, I, 213.
Veilleur automatique, II, 99.
Verrou électrique, II. 455.
Vitesse de l'électricité, I, 116.
Volt (Unité de force électro-motrice), I, 213.
Volta (Pile de), I, 105, 352.
Voltamètre, I, 137.
Voltmètre, I, 296, II, 535.
Wheastone (Pont de), I, 132.

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE Ier. — Les actions chimiques et les courants.

Modèles nouveaux de piles et d'accumulateurs..... 1
Étude des conditions générales de l'électrolyse..... 5
Applications industrielles; dépôt électrolytique des métaux..... 11
Affinage des métaux; électro-métallurgie..... 27
Applications diverses de l'électrolyse..... 32
Des effluves électriques..... 37

CHAPITRE II. — Les actions calorifiques et les courants.

Nouvelles piles thermo-électriques..... 40
Détermination des températures..... 43
De l'arc voltaïque..... 50
Applications directes des effets calorifiques des courants..... 55
Lumière électrique ; lampes à incandescence..... 62
Lampes à arc, régulateurs..... 80
Bougies électriques, lampe-soleil..... 119

CHAPITRE III. — Les actions mécaniques et les courants.

Généralités sur les machines d'induction..... 133
Étude des machines magnéto et dynamo-électriques ; caractéristique..... 141
Généralités sur les inducteurs, les induits, les collecteurs, etc..... 159
Description des principales machines magnéto-électriques..... 169
Description des principales machines dynamo-électriques..... 179
Applications des électro-aimants..... 199
Des machines d'induction comme moteurs..... 203
Étude générale de la transmission de l'énergie par le courant..... 208
Distribution de l'électricité..... 219
Exemples de transport d'énergie..... 236

CHAPITRE IV. — Systèmes télégraphiques et téléphoniques.

Considérations générales. Des sonneries..... 244
Principes des télégraphes; généralités..... 257
Description des principaux systèmes de télégraphie..... 278
Appareils divers de communications à distance..... 332
Du téléphone, généralités..... 343

Description des principaux systèmes de téléphones et de microphones..... 356
Applications diverses du téléphone..... 363

CHAPITRE V. — Compteurs, indicateurs, enregisteurs, régulateurs.

Horloges électriques..... 387
Enregistrement des phénomènes mécaniques et physiques..... 399
Indicateur des niveaux, des températures..... 411
Avertisseurs d'incendie, régulateurs de température..... 422
Compteurs, enregistreurs des données météorologiques..... 433
Appareils usités dans l'exploitation des chemins de fer..... 451
Contrôleurs divers..... 462

CHAPITRE VI. — Applications de l'électricité statique et des propriétés de l'étincelle électrique.

Applications de l'attraction des corps électrisés..... 465
Applications de la chaleur produite par l'étincelle..... 467
Électricité atmosphérique et terrestre..... 475
Des paratonnerres..... 484

CHAPITRE VII. — Applications spéciales de l'électricité a la physiologie et a la médecine.

Généralités; emploi de l'électricité statique..... 489
Des piles médicales et de leur emploi..... 490
Des courants interrompus et des courants induits..... 502
Du galvanocautère..... 514
Application des propriétés chimiques des courants..... 520
Emploi de l'électricité comme moyen de diagnostic..... 523

APPENDICE.

Machine à influence de Wimshurst..... 533
Machine rhéostatique de quantité..... 535
Voltmètre et ampèremètre de Sir William Thomson..... 535
Mesureur de courants de M. de Lalande..... 538
Galvanomètre à mercure..... 540
Compteur d'électricité Cauderay..... 543
Table alphabétique des matières..... 546
Table analytique des matières..... 551

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME DEUXIÈME

Bourloton, Imprimeries réunies, B.

WELLCOME LIBRARY INSTITUTE

8